THE

LAST CODEX

Si tout était perdu, c'est ici que tout recommencerait.

Les inventions de l'humanité : ce qu'elles sont, comment elles marchent et comment les reconstruire.

Édition imprimable du 14 octobre 2026
https://lastcodex.org

Sommaire

I Survie

Outils de pierre · il y a 3,3 millions d'années · 5
Maîtrise du feu · il y a 1 million d'années · 9
Corde & cordage · il y a 50 000 ans · 13

II Établissement

Arc & flèches · il y a 62 000 ans · 18
Céramique · il y a 18 000 ans · 23
Pain · il y a 12 400 ans · 27
Chaux et mortier de chaux · il y a 10 000 ans · 31
Eau potable · v. 8 400 av. J.-C. · 35
Briques · v. 7 500 av. J.-C. · 40
Tissage · v. 6 700 av. J.-C. · 44
Salaison · v. 6 050 av. J.-C. · 48
Irrigation · v. 6 000 av. J.-C. · 52
Fromage · v. 5 500 av. J.-C. · 57
Charrue · v. 5 000 av. J.-C. · 61
Charbon de bois · v. 4 500 av. J.-C. · 65
Teinture · v. 4 200 av. J.-C. · 70
Arc et voûte · v. 3 500 av. J.-C. · 74
Bière · v. 3 500 av. J.-C. · 79
Roue & essieu · v. 3 500 av. J.-C. · 83
Écriture · v. 3 300 av. J.-C. · 87
Voile · v. 3 200 av. J.-C. · 91
Savon · v. 2 800 av. J.-C. · 95
Numération de position · v. 2 050 av. J.-C. · 99
Tannage du cuir · v. 1 500 av. J.-C. · 103
Cadran solaire · v. 1 500 av. J.-C. · 107
Rotation des cultures · v. 700 av. J.-C. · 111
Serrure & clé · v. 700 av. J.-C. · 116

III Artisanat & cités

Tour de potier · v. 4 000 av. J.-C. · 121
Bronze · v. 3 300 av. J.-C. · 125
Mesures et étalons · v. 3 000 av. J.-C. · 129
Verre · v. 2 500 av. J.-C. · 134
Métallurgie du fer · v. 1 200 av. J.-C. · 138
Acier · v. 1 000 av. J.-C. · 142
Aqueduc · v. 690 av. J.-C. · 147
Grue & poulie · v. 515 av. J.-C. · 151
Engrenages · v. 300 av. J.-C. · 155
Roue hydraulique · v. 300 av. J.-C. · 159
Pompe à piston · v. 270 av. J.-C. · 163
Béton romain · v. 200 av. J.-C. · 167
Papier · v. 150 av. J.-C. · 172
Distillation · v. 300 · 176
Collier d'attelage · v. 480 · 180
Poudre noire · v. 850 · 184
Moulin à vent · v. 900 · 188
Rouet · v. 1000 · 192
Boussole · v. 1088 · 196
Lunettes de vue · v. 1286 · 199
Horloge mécanique · v. 1300 · 203
Presse à imprimer · v. 1440 · 207

IV Science & industrie

Navigation astronomique v. 1460 · 212
Microscope v. 1590 · 216
Lunette astronomique 1608 · 220
Thermomètre et baromètre v. 1654 · 224
Machine à vapeur 1712 · 229
Montgolfière 1783 · 233
Vaccination 1796 · 237
Pile électrique 1800 · 242
Locomotive à vapeur 1804 · 246
Conserves & pasteurisation 1810 · 250
Bicyclette 1817 · 255
Ciment Portland 1824 · 259
Photographie v. 1827 · 263
Turbine hydraulique 1827 · 267
Machine à coudre 1830 · 272
Générateur électrique 1831 · 276
Moteur électrique 1834 · 280
Réfrigération 1834 · 284
Télégraphe électrique 1837 · 288
Caoutchouc vulcanisé 1839 · 292
Anesthésie 1846 · 296
Hygiène et antisepsie 1847 · 301
Accumulateur au plomb 1859 · 306

V Âge électrique

Béton armé v. 1848 · 311
Moteur à combustion interne 1876 · 316
Téléphone 1876 · 320
Ampoule à incandescence 1879 · 324
Turbine à vapeur 1884 · 328
Transformateur 1885 · 333
Aluminium 1886 · 338
Éolienne 1887 · 342
Radio v. 1895 · 347
Radiographie 1895 · 351
Avion 1903 · 355
Pénicilline 1928 · 359
Transistor 1947 · 364
Ordinateur 1948 · 368
Cellule solaire 1954 · 372
Réhydratation orale 1968 · 377

I

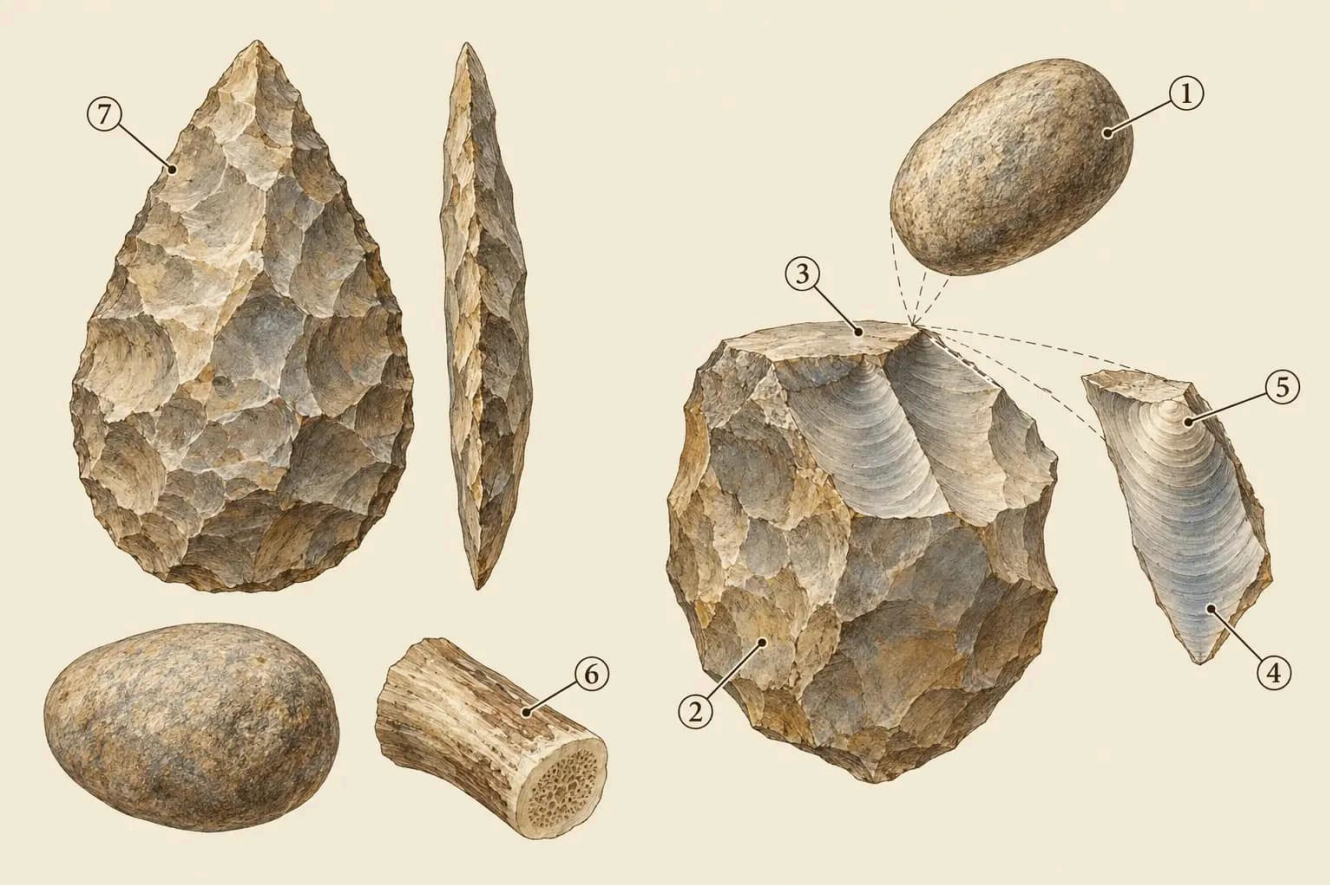
Survie

Outils de pierre

Le premier tranchant

il y a 3,3 millions d'années · Préhistoire · Survie

Mène à : Arc et voûte (p. 74), Arc & flèches (p. 18), Charbon de bois (p. 65), Irrigation (p. 52), Tannage du cuir (p. 103), Chaux et mortier de chaux (p. 31), Serrure & clé (p. 116), Mesures et étalons (p. 129), Charrue (p. 61), Roue & essieu (p. 83), Écriture (p. 87)



1 Percuteur 2 Nucléus 3 Plan de frappe 4 Éclat 5 Bulbe de percussion 6 Percuteur tendre en bois de cerf 7 Biface

La plupart des outils de pierre sont des morceaux de roche cassés de façon contrôlée pour obtenir un tranchant qui coupe, racle ou fend. C'est la plus ancienne technique connue : les premiers datent d'environ 3,3 millions d'années, et certains se fabriquaient encore au XXe siècle.

Ce que c’est

Toute pierre utilisée comme outil en fait partie, du simple percuteur à la meule à grains, mais la plupart ont été façonnées en détachant des éclats pour obtenir un tranchant ou une pointe. Le plus simple est un éclat coupant détaché d’un galet et utilisé aussitôt pour découper la viande ou écorcer une branche. Les plus aboutis, comme une fine pointe de lance ou une hache polie, demandaient des heures de travail habile.

Pendant l’essentiel de l’histoire humaine, la pierre a été le principal matériau dur disponible. Le bois, l’os, la peau et les fibres se travaillaient avec des tranchants de pierre. Et comme la pierre se conserve presque indéfiniment, ces outils sont aussi la principale archive dont disposent les archéologues sur la vie des premiers humains.

Comment ça marche

Les bonnes pierres à outils sont dures, cassantes, à grain très fin et sans fil interne : silex, chaille, obsidienne (un verre volcanique) et certains quartzites. Frappée près d'un bord, une telle pierre se fend selon un cône, la même forme qu'un plomb de carabine laisse dans une vitre. La fissure s'incurve vers la surface et libère un éclat. Cette cassure en forme de coquille s'appelle cassure conchoïdale, et elle donne des tranchants très minces.

Le tailleur frappe le nucléus sur une surface plane, le plan de frappe, près de son bord. Là où le plan de frappe rejoint la face du nucléus, l'angle doit être inférieur à 90 degrés, sinon le coup ne fait qu'écraser le bord. L'éclat détaché garde la trace du coup : un renflement arrondi juste sous le point d'impact, le bulbe de percussion, et de fines ondulations qui s'en éloignent. Le nucléus conserve le négatif en creux, qui peut servir de plan de frappe pour le coup suivant.

La retouche par pression : un andouiller détache de petits éclats du bord, le cuir protège la paume.

Trois techniques permettent de doser le résultat. Le percuteur dur, en général un galet de quartzite, enlève de gros éclats épais. Le percuteur tendre, en bois de cerf, en os ou en bois dur, enlève des éclats plus longs et plus minces ; il sert à amincir et à façonner. La retouche par pression appuie une pointe de bois de cerf contre le bord jusqu'à ce qu'un petit éclat saute ; elle donne la forme finale et un tranchant droit et vif.

Comment le fabriquer

La taille s'apprend en pratiquant, et les premières heures produisent surtout de la pierre cassée. Il faut des rognons de silex ou de chaille, ou des blocs d'obsidienne ou de verre épais de bouteille ; deux ou trois percuteurs de poids différents ; un percuteur en bois de cerf et un andouiller ; un épais tampon de cuir ; des lunettes de protection ; des gants de cuir ; et une bâche pour recueillir les déchets.

Choisir la pierre. Chercher un rognon sans fissures, sans trous ni zones grenues. Le tapoter avec un petit caillou : un son clair indique une pierre saine, un son mat des défauts cachés.

Trouver un plan de frappe. Repérer un bord où deux surfaces se rencontrent à moins de 90 degrés. Frapper un peu en retrait de ce bord, quelques millimètres pour un éclat mince, davantage pour un éclat épais, d'un coup bref et ferme qui se prolonge vers l'extérieur, loin du nucléus. Poser le nucléus sur le tampon, sur la cuisse, jamais dans la paume nue.

Faire un outil sur éclat. Un seul bon éclat est déjà un couteau. On l'utilise tel quel, ou on retouche son dos à petits coups pour mieux le tenir.

Façonner un biface. Faire le tour d'un rognon plat en enlevant des éclats alternativement sur une face et sur l'autre, pour que le bord devienne une ligne sinueuse au milieu de la pièce. Passer au percuteur en bois de cerf pour amincir les faces. Avant chaque coup, abraser légèrement le bord avec une pierre rugueuse pour qu'il ne s'écrase pas.

Finir par pression. Tenir la pièce sur le tampon, appuyer l'andouiller vers le bas et vers l'intérieur sur le bord, et enlever de petits éclats l'un après l'autre pour régulariser et aiguiser le tranchant.

> **Sécurité.** Les éclats frais coupent mieux qu'un rasoir et partent vite. Toujours porter des lunettes de protection et protéger mains et cuisses avec du cuir. Travailler dehors ou dans un local bien aéré, sans respirer la poussière fine : silex et chaille sont de la silice, et des années de poussière provoquent la silicose, qui a tué beaucoup de tailleurs de pierres à fusil. Recueillir les déchets sur la bâche, humidifier la poussière plutôt que de la balayer à sec, et mettre les éclats coupants dans une boîte ou un seau fermé. Tenir enfants et animaux à l'écart.

Histoire et évolutions

Outils oldowayens : un galet au tranchant irrégulier, les éclats qui en ont été tirés et le percuteur.

Les plus anciens outils de pierre connus viennent de Lomekwi 3, à l'ouest du lac Turkana, au Kenya. Ils ont environ 3,3 millions d'années, soit plus que les plus anciens fossiles connus du genre *Homo*. L'équipe a trouvé 149 nucléus, éclats, percuteurs et enclumes possibles, obtenus par des gestes simples, proches du concassage. On ignore qui les a faits ; *Kenyanthropus* et *Australopithecus* vivaient alors dans la région.

Les outils de l'Oldowayen apparaissent sur plusieurs sites d'Afrique de l'Est à partir d'environ 2,6 millions d'années, et peut-être dès 2,9 millions d'années à Nyayanga, au Kenya : galets dont on a retiré quelques éclats, éclats tranchants et percuteurs. Vers 1,7 million d'années, toujours en Afrique de l'Est, apparaissent les premiers bifaces largement admis, de grands outils façonnés sur les deux faces en forme de goutte, avec un long tranchant. On en a fabriqué pendant plus d'un million d'années, en Afrique, en Europe et en Asie.

Plus tard, les tailleurs apprennent à préparer un nucléus pour qu'un seul coup en détache un éclat de forme prévue. Il y a environ 200 000 ans, des pointes sont fixées sur des hampes en bois pour faire des lances, et des perçoirs et grattoirs de pierre servent à travailler peaux et bois. En Europe et en Asie occidentale, entre 50 000 et 10 000 ans environ, la lame longue et mince devient le support standard. Les microlithes, petits segments de lame insérés en rangées dans des manches et des flèches, apparaissent en Afrique australe vers 71 000 ans et se répandent dans de nombreuses régions à la fin de la dernière glaciation.

Au Néolithique, les lames de hache étaient polies sur du grès pour les rendre plus résistantes.

Les agriculteurs du Néolithique, à partir d'environ 10 000 ans avant notre ère, polissent des haches de pierre pour défricher la forêt. Le métal a remplacé la pierre lentement, et jamais tout à fait. À Brandon, en Angleterre, on a taillé des pierres à fusil jusqu'au XXe siècle, et des lames d'obsidienne servent encore dans certaines opérations délicates, car leur tranchant est plus fin que celui des scalpels d'acier.

Chiffres clés

Plus anciens outils connus
Environ 3,3 millions d'années, Lomekwi 3 (Kenya)

Premiers bifaces
Il y a environ 1,7 million d'années, Afrique de l'Est

Durée de vie du biface
Fabriqué pendant plus d'un million d'années

Un métier tardif de la taille
Pierres à fusil, produites en quantité à Brandon (Angleterre) jusqu'au XXe siècle

Sources

1. Stone Tools · Smithsonian National Museum of Natural History, Human Origins Program https://humanorigins.si.edu/evidence/behavior/stone-tools
2. Scientists Discover World's Oldest Stone Tools · Columbia Climate School, State of the Planet https://news.climate.columbia.edu/2015/05/20/scientists-discover-worlds-oldest-stone-tools/
3. Small, lethal tools have big implications for early modern human complexity · Arizona State University https://news.asu.edu/content/small-lethal-tools-have-big-implications-early-modern-human-complexity
4. Stone tool · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Stone_tool
5. Knapping · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Knapping
6. Introducing a new experimental design for controlled studies of flake formation: results for exterior platform angle, platform depth, angle of blow, velocity, and force · Journal of Archaeological Science https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.05.004
7. A Synthesis of the Dibble et al. Controlled Experiments into the Mechanics of Lithic Production · Journal of Archaeological Method and Theory https://doi.org/10.1007/s10816-022-09586-2
8. The results of lithic experiments performed on glass cores are applicable to other raw materials · Archaeological and Anthropological Sciences https://doi.org/10.1007/s12520-019-00963-9

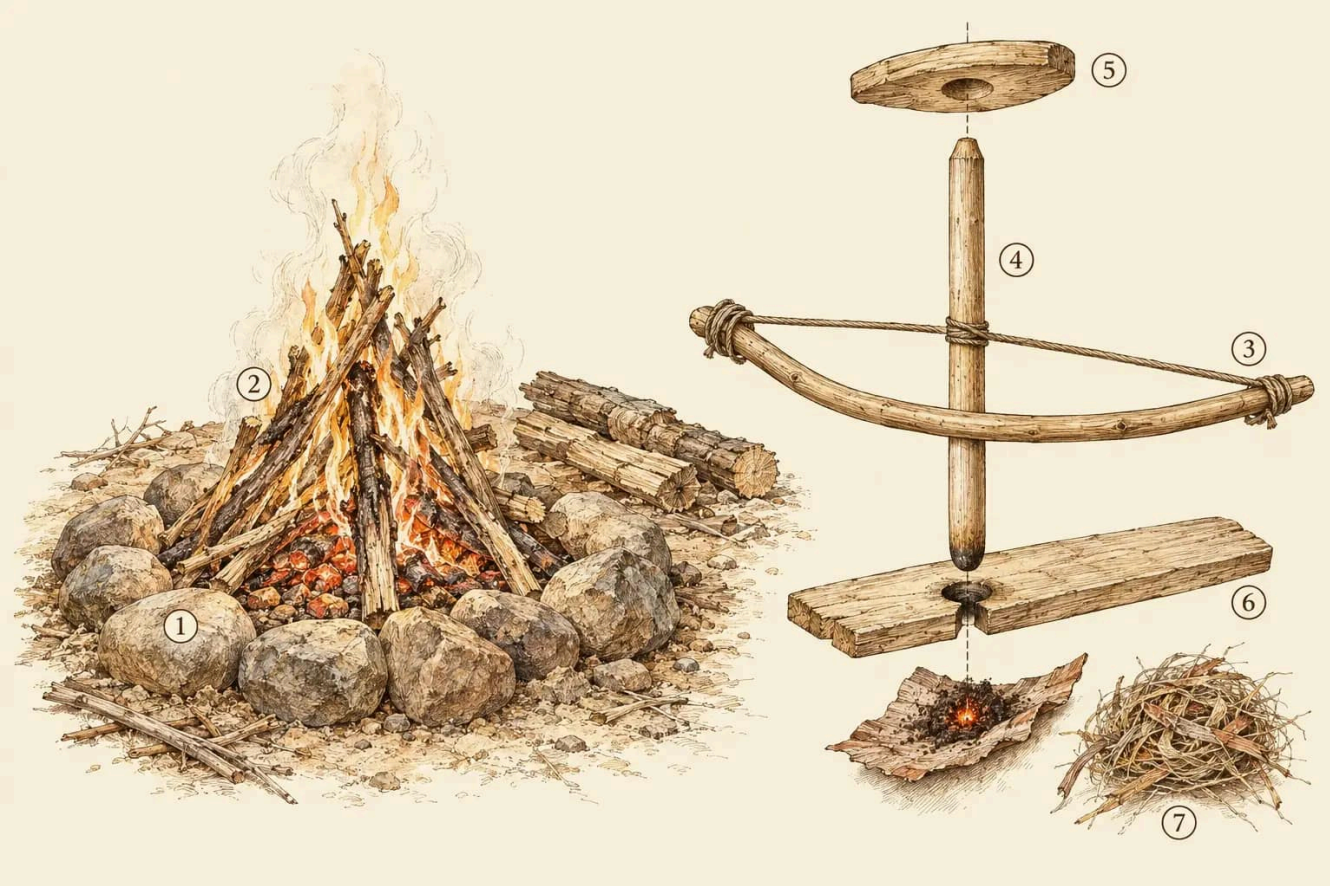
Faits vérifiés le 2026-10-11

Maîtrise du feu

Lumière, chaleur et cuisson

il y a 1 million d'années · Préhistoire · Survie

Mène à : Pain (p. 27), Bronze (p. 125), Conserves & pasteurisation (p. 250), Charbon de bois (p. 65), Distillation (p. 176), Eau potable (p. 35), Teinture (p. 70), Poudre noire (p. 184), Montgolfière (p. 233), Tannage du cuir (p. 103), Chaux et mortier de chaux (p. 31), Céramique (p. 23), Béton romain (p. 167), Savon (p. 95), Caoutchouc vulcanisé (p. 292)



1 Pierres du foyer 2 Bois de feu 3 Archet 4 Fuseau 5 Paumelle (crapaudine) 6 Planchette et encoche 7 Nid d'herbes sèches

Maîtriser le feu, c'est savoir l'entretenir, le transporter, puis l'allumer à volonté. Les ancêtres de l'humanité utilisaient déjà le feu il y a au moins un million d'années, et il leur apportait chaleur, lumière, protection et nourriture cuite.

Ce que c'est

Le feu est une réaction chimique : un combustible se combine à l'oxygène de l'air et dégage de la chaleur et de la lumière. Sa maîtrise s'est acquise par étapes. D'abord, garder un feu allumé par la nature, après la foudre ou un incendie de brousse. Ensuite, le transporter et l'alimenter pendant des jours. Enfin, l'allumer quand on en a besoin.

Le feu réchauffe pendant la nuit et permet de vivre sous des climats plus froids. Il éclaire les grottes, tient les bêtes à distance, durcit la pointe des épieux en bois et cuit les aliments. La viande et les tubercules cuits sont plus tendres et fournissent plus d'énergie à la digestion que crus.

Comment ça marche

Un feu a besoin de trois choses en même temps : du combustible, de l'oxygène et assez de chaleur pour entretenir la réaction. Qu'il en manque une, et il meurt.

Le bois ne brûle pas directement. La chaleur le décompose d'abord en gaz inflammables et laisse du charbon de bois. Les gaz brûlent dans la flamme, au-dessus du bois, et le charbon rougeoie en dessous. C'est pour cela qu'on monte un feu du plus petit au plus gros : les brindilles fines et sèches chauffent vite, dégagent leurs gaz et portent les branches plus épaisses à température.

Il existe deux grandes façons traditionnelles de faire du feu. Les méthodes par friction frottent un bois contre un autre jusqu'à accumuler une fine poussière de bois brûlante qui se met à rougeoyer. Le foret à main fait tourner un bâton entre les paumes ; l'archet, dessiné sur la planche, fait le même travail avec une corde enroulée autour du fuseau, plus vite et avec moins d'effort. Cette poussière incandescente est une braise. Posée dans un nid d'herbes sèches et d'écorce effilochée, puis soufflée doucement, elle donne une flamme.

Le silex frappé contre la pyrite fait jaillir des étincelles assez chaudes pour faire rougeoyer l'amadou sec.

Les méthodes par percussion produisent des étincelles. Quand l'arête dure d'un silex frappe la pyrite de fer, elle en arrache de minuscules grains qui brûlent dans l'air. Silex contre silex, on n'obtient presque rien. Les étincelles sont petites et brèves : il leur faut un support qui prend facilement, comme l'amadou, la couche interne de l'amadouvier, séchée et battue jusqu'à devenir souple et duveteuse.

Comment le construire

Avec le foret à main, les paumes font tourner un bâton dans un sens puis dans l'autre jusqu'à ce que la sciure de l'encoche se mette à rougeoyer.

L'archet est la méthode par friction la plus fiable à apprendre. Il faut un couteau ou un éclat de pierre tranchant, une cordelette, et du bois mort, sec et moyennement tendre : saule, tilleul, peuplier ou cèdre.

Préparer le foyer. Choisir un sol nu et plat, loin des branches basses et de l'herbe sèche. Dégager un cercle d'environ trois mètres de diamètre, sans herbe, feuilles ni brindilles, et entourer la fosse de pierres. Tout rassembler avant de commencer : deux poignées d'herbe sèche et d'écorce effilochée, une botte de brindilles fines comme un crayon, puis des branches grosses comme le pouce et comme le poignet.

Tailler le matériel. Le fuseau est un bâton droit d'environ 20 cm, de l'épaisseur du pouce, arrondi en haut et émoussé en bas. La planchette est une pièce plate d'environ 2 cm d'épaisseur. La paumelle est un morceau de bois plus dur ou une pierre, de la taille de la paume, creusé d'un petit logement sur sa face inférieure ; un peu de graisse ou une feuille verte dans ce logement empêche le haut du fuseau de chauffer. L'archet est un bâton raide, légèrement courbe, long comme le bras, avec une corde juste assez lâche pour faire un tour autour du fuseau ; une fois en place, elle doit le serrer fermement.

Amorcer et entailler. Percer un creux peu profond près du bord de la planchette jusqu'à ce qu'il noircisse, puis tailler une encoche en V du creux jusqu'au bord, sur environ un huitième du cercle. Glisser un morceau d'écorce sous l'encoche pour recueillir la poussière.

Forer. À genoux, un pied sur la planchette, le poignet qui tient la paumelle calé contre le tibia, appuyer régulièrement sur la paumelle et manier l'archet à longs mouvements réguliers. Accélérer quand le creux fume. Quand l'encoche est pleine d'une poussière sombre qui continue de fumer seule, la braise est là.

Faire naître la flamme. Verser la braise dans le nid, le refermer et souffler lentement jusqu'à ce qu'il s'embrase. Le poser dans la fosse, dresser les brindilles en cône par-dessus et n'ajouter le gros bois qu'une fois les brindilles bien prises.

> **Sécurité.** Dans l'herbe sèche ou par vent fort, le feu court plus vite qu'un homme. Ne jamais allumer de feu par sécheresse, en période d'interdiction ou par grand vent, et garder de l'eau ou de la terre meuble à portée de main. Ne pas entourer la fosse de galets de rivière humides : l'eau qu'ils contiennent peut les faire éclater. Ne jamais laisser un feu sans surveillance. Pour l'éteindre, noyer, remuer les cendres, noyer encore, jusqu'à ce que tout, braises enfouies comprises, soit froid au toucher. S'exercer uniquement en plein air : un feu ouvert dans un abri ou une grotte remplit l'air de fumée et de monoxyde de carbone, qui peuvent tuer.

Histoire et évolutions

Les plus anciennes traces bien établies de feu en contexte humain viennent de la grotte de Wonderwerk, en Afrique du Sud. En 2012, une équipe y a trouvé des cendres microscopiques et des os brûlés dans des couches d'environ un million d'années, avec des outils de pierre acheuléens, probablement taillés par *Homo erectus*. Une étude publiée en 2026 a mis au jour des os brûlés plus bas dans la même séquence, dans des couches datées de 1,07 à 1,79 million d'années, à une trentaine de mètres de l'entrée, là où aucun incendie naturel ne pouvait arriver. Des indices plus anciens au Kenya, vers 1,5 million d'années, reposent sur des sols rougis qu'un feu naturel pourrait aussi expliquer.

À Gesher Benot Ya'aqov, en Israël, des graines, du bois et des amas de silex brûlés suggèrent des feux entretenus à des emplacements fixes il y a environ 790 000 ans. Les foyers nets ne deviennent courants qu'entre 400 000 et 300 000 ans environ, en Afrique, au Proche-Orient et en Europe. Avant, les humains récupéraient sans doute le feu des incendies naturels et le gardaient vivant.

La plus ancienne preuve d'allumage vient de Barnham, dans le Suffolk, en Angleterre, publiée en 2025. Il y a environ 400 000 ans, des humains y ont chauffé à plusieurs reprises la même plaque d'argile au-delà de 700 °C. Ils ont laissé des bifaces éclatés par le feu et deux fragments de pyrite, un minéral si rare dans ce paysage qu'il a sans doute été apporté exprès. Le record précédent, sur des sites néandertaliens du nord de la France, remontait à environ 50 000 ans.

Les archéologues lisent les feux anciens en coupe : cendres et charbons au-dessus d'une terre rougie par la chaleur.

Chiffres clés

Plus anciennes traces d'usage du feu
Il y a environ 1 million d'années, grotte de Wonderwerk (Afrique du Sud), peut-être jusqu'à 1,8 million

Plus ancienne preuve d'allumage
Il y a environ 400 000 ans, Barnham (Angleterre)

Usage courant
Généralisé à partir de 400 000 à 300 000 ans environ

Température du foyer de Barnham
Plus de 700 °C

Sources

1. Control of fire by early humans · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Control_of_fire_by_early_humans
2. Evidence that human ancestors used fire one million years ago · ScienceDaily (University of Toronto) https://sciencedaily.com/releases/2012/04/120402162548.htm
3. Early humans were bringing fire into caves 1.8 million years ago · ScienceDaily (Hebrew University of Jerusalem) https://sciencedaily.com/releases/2026/06/260623083123.htm
4. Evidence of Hominin Control of Fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel (Science, 2004) · Hebrew University of Jerusalem https://cris.huji.ac.il/en/publications/evidence-of-hominin-control-of-fire-at-gesher-benot-yaaqov-israel/
5. Earliest fire making, dating back 400,000 years, unearthed in Suffolk · Natural History Museum, London https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2025/december/earliest-fire-making-dating-back-400-000-years-unearthed-in-suffolk-england.html
6. Research shows humans making fire 350,000 years earlier than thought · University of Liverpool https://news.liverpool.ac.uk/?p=131468
7. Wood Handbook, chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties of Wood (FPL-GTR-190) · USDA Forest Service, Forest Products Laboratory https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/37428.pdf
8. The Physics of Fire by Friction · University of Dayton (Bradley D. Duncan) https://ecommons.udayton.edu/ece_fac_pub/418
9. Lighting a fire using friction requires an understanding of some physics principles · University of Dayton Magazine https://udayton.edu/magazine/2023/12/lighting-fire.php
10. Ignition of Wood (Vytenis Babrauskas) · Fire Science and Technology Inc., via CFITrainer.net https://www.cfitrainer.net/programs/35a84de0-e505-4899-be34-f31de9d9d570/document/2005_CCAI_Wood_ignition.pdf

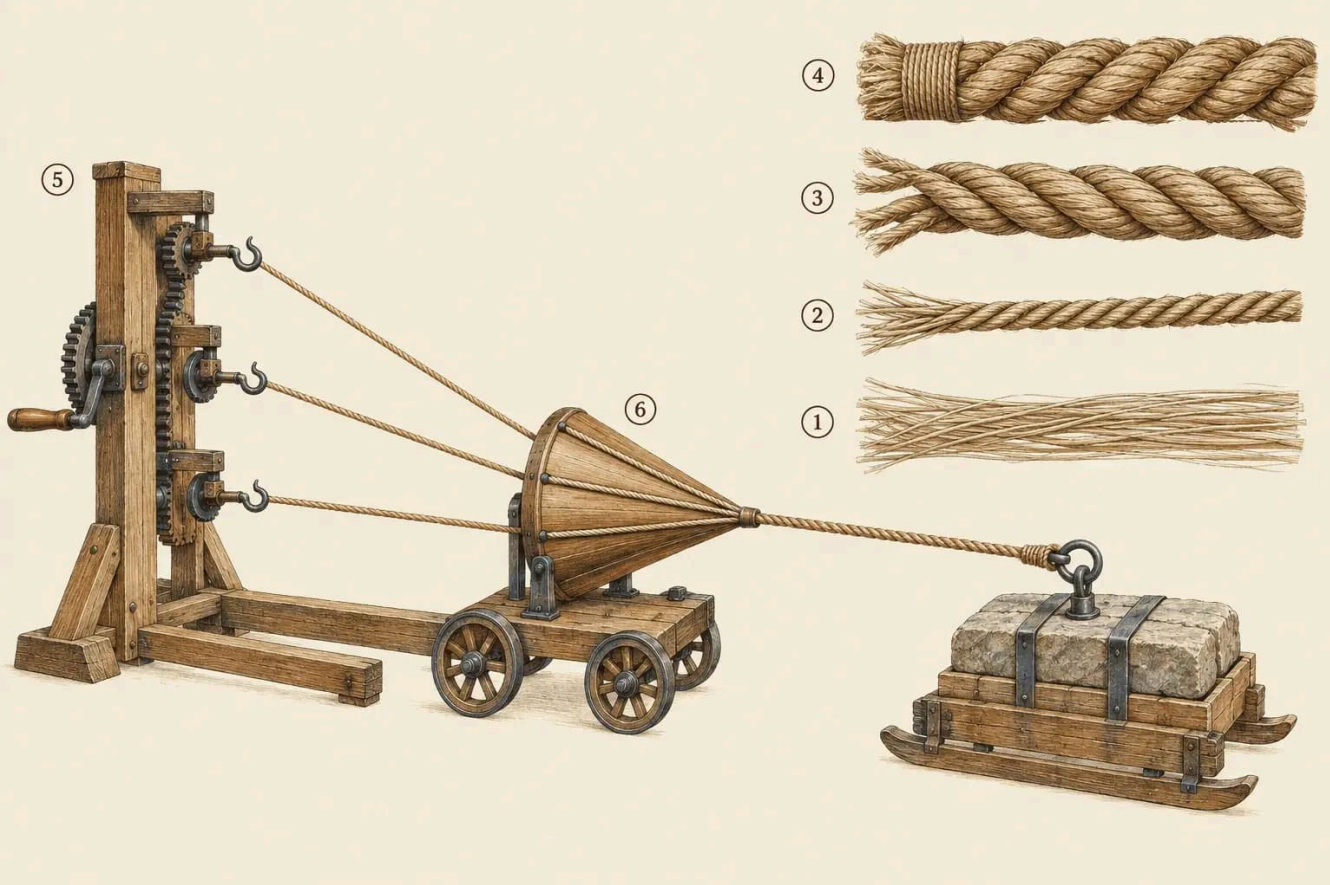
Faits vérifiés le 2026-10-11

Corde & cordage

Des fibres torsadées qui tiennent tout

il y a 50 000 ans · Préhistoire · Survie

Mène à : Arc & flèches (p. 18), Grue & poulie (p. 151), Eau potable (p. 35), Teinture (p. 70), Collier d'attelage (p. 180), Irrigation (p. 52), Mesures et étalons (p. 129), Charrue (p. 61), Voile (p. 91), Rouet (p. 192), Tissage (p. 44), Moulin à vent (p. 188)



1 Fibres 2 Fil de caret 3 Toron 4 Cordage à trois torons 5 Manivelle et crochets (rouet) 6 Toupin

Une corde traditionnelle est faite de fibres courtes tordues en fils, les fils en torons et les torons en corde : on obtient une ligne bien plus longue et plus solide qu'aucune fibre seule. Les Néandertaliens tordaient déjà des cordelettes il y a plus de 40 000 ans, et depuis, on s'en sert pour attacher, haler, lever et gréer.

Ce que c’est

Une corde est une ligne longue et souple qui résiste à la traction. La corde traditionnelle est faite de fibres qui mesurent chacune de quelques centimètres à un mètre environ : tiges et feuilles de plantes, liber, tendons ou poils d’animaux. C’est la torsion qui les tient ensemble. Les cordes synthétiques modernes peuvent utiliser des filaments continus, et beaucoup sont tressées plutôt que commises.

Une corde fine s’appelle cordelette, ficelle ou fil. Elle attache les charges, hale les bateaux et les pierres, tend les filets et les pièges, et grée les voiliers.

Comment ça marche

Une fibre seule est faible et courte. Quand on en tord beaucoup ensemble, la torsion les plaque les unes contre les autres, et le frottement les empêche de glisser. Si l'on tire sur le fil, il se resserre et serre plus fort : plus il est chargé, mieux il tient.

Un fil tordu tout seul a tendance à se détordre. La solution consiste à le tordre de nouveau dans l'autre sens. Les fibres sont filées en fil de caret dans un sens ; plusieurs fils sont commis en sens inverse pour former un toron ; trois torons sont commis ensemble dans le premier sens pour former le cordage. La torsion résiduelle de chaque étage tire en sens opposé à celle de l'étage qu'il contient : les efforts s'équilibrent et la corde garde sa forme. Le cordage à trois torons ainsi construit est dit commis en aussière.

Le contre-enroulement : chaque mèche est tordue dans un sens, puis enroulée sur l'autre dans le sens contraire.

La même règle s'applique à la plus petite échelle. Dans le contre-enroulement, une méthode simple à la main, deux mèches de fibres sont tordues chacune dans un sens, puis enroulées l'une sur l'autre dans l'autre sens : on obtient une cordelette à deux brins qui ne se défait pas. Une longue corde se fabrique de la même manière, en plus grand : une manivelle tord les torons, et un bloc de bois rainuré, le toupin, les tient écartés jusqu'à ce qu'ils se commettent derrière lui.

Comment la fabriquer

Les bonnes fibres à corde sont longues et solides : ortie, lin, chanvre, liber de tilleul ou de saule, feuilles de massette, ou ficelle de coton ou de chanvre du commerce pour s'entraîner.

Préparer la fibre. Couper des tiges d'ortie en fin d'été, avec des gants. Les écraser, les fendre, retirer le cœur ligneux et détacher la peau extérieure qui porte les fibres. Les laisser sécher, puis les humidifier légèrement avant usage. L'écorce de tilleul doit tremper plusieurs semaines dans l'eau avant que les couches fibreuses se séparent.

Faire une cordelette à la main. Prendre une mèche et la plier un peu à côté de son milieu, pour que les deux bouts soient de longueurs inégales. Pincer la pliure. Tordre la mèche du haut en l'éloignant de soi, puis la rabattre sur celle du bas vers soi. Recommencer en avançant la pince. Quand une mèche s'épuise, poser une nouvelle poignée de fibres le long d'elle et la tordre avec ; les bouts décalés évitent que deux raccords tombent au même endroit.

Installer une corderie. Pour une corde plus grosse, fixer un bâti portant trois crochets qu'une manivelle fait tourner ensemble. Tendre trois longueurs égales de cordelette ou de fil entre ces crochets et un crochet unique monté sur émerillon, sur un traîneau lesté à l'autre bout. Bloquer pour l'instant l'émerillon avec une cheville, et placer le toupin entre les torons tout près du traîneau, un toron dans chaque rainure.

Tordre et commettre. Tourner la manivelle dans le sens qui resserre la torsion déjà présente dans le fil, jusqu'à ce que chaque toron soit dur et vrille dès qu'on le détend. Retirer alors la cheville pour libérer l'émerillon. Continuer à tourner pendant qu'un aide avance lentement le toupin vers le bâti : derrière lui, les torons se commettent seuls en sens inverse, et le traîneau avance à mesure que la corde raccourcit.

Finir les bouts. Lier serré chaque extrémité avec de la ficelle fine, une surliure, avant de couper, sinon les torons se décommettent.

> **Sécurité.** Une corde en charge emmagasine de l'énergie ; si elle casse, les bouts reviennent violemment : ne jamais se tenir dans l'axe d'une corde sous tension. Ne pas utiliser de corde faite maison pour grimper, pour lever des personnes ou pour des charges au-dessus de quelqu'un. La manivelle accumule aussi de la torsion : la tenir quand on s'arrête, sinon elle repart en arrière. Porter des gants pour les orties et pour faire filer une corde entre ses mains.

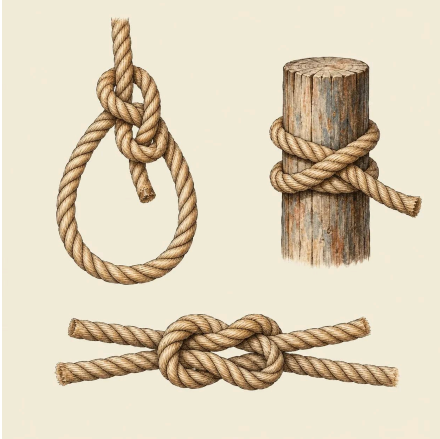
Histoire et évolutions

La plus ancienne preuve directe d'une cordelette vient de l'abri du Maras, en Ardèche. En 2020, des chercheurs y ont décrit un fragment d'environ 6 mm collé à un outil de pierre, fait de trois mèches de fibres de liber, probablement de conifère, tordues puis retordues ensemble. Il a entre 41 000 et 52 000 ans et a été fabriqué par des Néandertaliens, qui savaient donc tordre dans deux sens opposés.

L'outil en ivoire de Hohle Fels, tel qu'on le restitue : les fibres passées dans ses quatre trous sont tordues en corde.

Dans la grotte de Hohle Fels, dans le sud-ouest de l'Allemagne, les fouilleurs ont retrouvé une baguette d'ivoire de mammouth d'environ 20 cm, percée de quatre trous bordés de rainures en spirale, datée de 35 000 à 40 000 ans. En 2024, Nicholas Conard et Veerle Rots y ont vu un outil de corderie probable : des fibres végétales restaient prises dans ses rainures, et un bâton semblable de la grotte voisine de Geißenklösterle a des rainures usées comme par le passage de fibres. Avec des répliques, des équipes de quatre ou cinq personnes ont fabriqué environ 5 mètres de corde solide en 10 minutes ; les feuilles de massette donnaient de très bons résultats.

Les sociétés agricoles ont produit de la corde à bien plus grande échelle. Les Égyptiens faisaient des cordes de roseau, de papyrus, de fibre de palmier et de lin, et des équipes halant sur des cordes déplaçaient les pierres des monuments. À Ouadi Gaouasis, un port pharaonique de la mer Rouge, les archéologues ont trouvé des rouleaux de cordages de navire, soigneusement noués et rangés dans des grottes creusées pour les expéditions vers le pays de Pount.



Le nœud de chaise forme une boucle fixe, le nœud de cabestan amarre à un poteau, le nœud plat serre un fagot ; il ne convient pas pour joindre deux cordes en charge.

En Europe, du Moyen Âge au XIXe siècle, les marines à voile fabriquaient leurs cordages dans des corderies, des bâtiments assez longs pour commettre une corde entière d'un seul tenant. La corderie de l'arsenal de Chatham, en Angleterre, mesure près de 350 mètres, et on y fait de la corde depuis plus de 400 ans. La corde en nylon est apparue pendant la Seconde Guerre mondiale, et à partir des années 1950 les fibres synthétiques ont pris la plupart des usages du chanvre et du manille.

Chiffres clés

Plus ancienne cordelette connue
41 000 à 52 000 ans, abri du Maras (France)

Outil de corderie ancien probable
35 000 à 40 000 ans, Hohle Fels (Allemagne)

Construction habituelle
3 torons, torsion inversée à chaque étape

Cadence préhistorique (outil reconstitué)
Environ 5 m de corde en 10 minutes, à 4 ou 5 personnes

Sources

1. Neanderthal cord weaver · CNRS https://www.cnrs.fr/en/press/neanderthal-cord-weaver
2. Rope making in the Aurignacian of Central Europe more than 35,000 years ago · Science Advances (PubMed Central) https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10830101/
3. Archaeologist Kathryn Bard's amazing Egyptian digs · Boston University https://www.bu.edu/articles/2009/archaeologist-kathryn-bard%e2%80%99s-amazing-egyptian-digs/
4. The Ropery · The Historic Dockyard Chatham https://thedockyard.co.uk/attractions/the-ropery
5. Rope · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Rope
6. Ropewalk · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ropewalk
7. The ancient art of laying rope · Europhysics Letters (arXiv) https://arxiv.org/abs/1004.0814
8. Plymouth Cordage Company Ropewalk · Mystic Seaport Museum https://mysticseaport.org/?p=355570
9. Hawser-laid · Practical Boat Owner https://www.pbo.co.uk/nautical-almanac/glossary-of-nautical-terms/hawser-laid-9204
10. Three strand hawser laid rope · Lifting Equipment Engineers Association https://copsule.leeaint.com/copsule/en-GB/latest/id-b54f2a33-5063-40e7-f243-517683d1bf63.html

Faits vérifiés le 2026-10-11

II

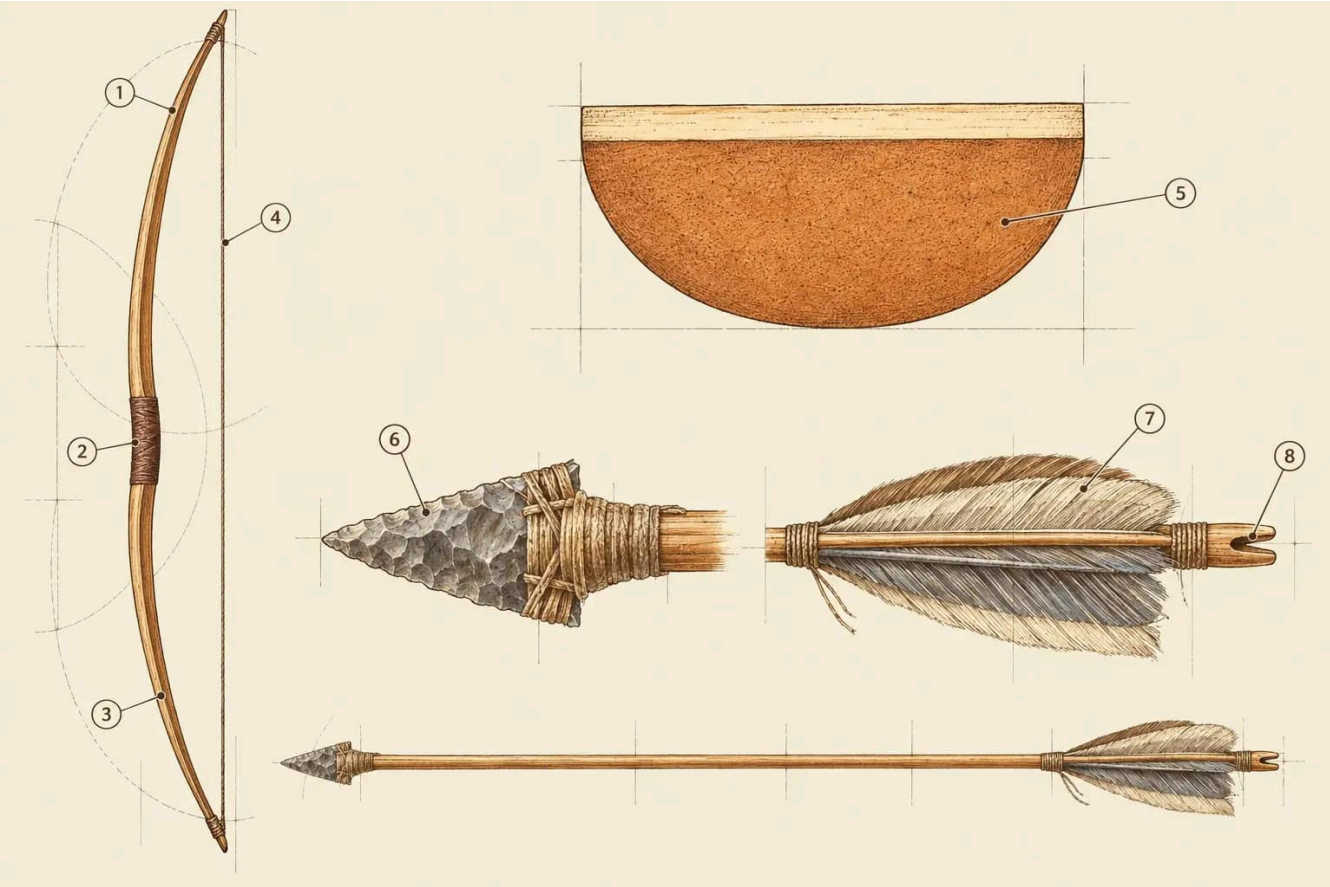
Établissement

Arc & flèches

Une énergie stockée puis libérée

il y a 62 000 ans · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5), Corde & cordage (p. 13)



1 Branche supérieure 2 Poignée 3 Branche inférieure 4 Corde 5 Coupe d'une branche : aubier au dos, bois de cœur au ventre
6 Pointe en silex ligaturée au tendon 7 Empennage 8 Encoche

L'arc accumule dans ses branches courbées l'effort des bras de l'archer et le restitue en une fraction de seconde, lançant la flèche bien plus vite et plus loin qu'une main ne pourrait le faire. De petites pointes de pierre d'Afrique du Sud laissent penser qu'on tirait déjà des flèches il y a environ 64 000 ans, et l'arc est resté une arme de chasse et de guerre jusqu'à ce que les armes à feu le remplacent.

Ce que c'est

Un arc est une baguette flexible, le plus souvent en bois, dont les deux extrémités sont reliées par une corde ; il fonctionne comme un ressort tenu à la main. En tirant la corde, on courbe la baguette ; quand on la lâche, la baguette se redresse et la corde projette la flèche. La flèche est une tige légère et droite, munie d'une pointe à l'avant et de plumes à l'arrière qui la maintiennent pointe en avant pendant le vol.

L'arc de la planche est un arc simple, taillé dans une seule pièce de bois, du type de l'arc long anglais : une douelle d'if à peu près aussi haute que l'archer, plate sur le dos et bombée sur le ventre, si bien que sa section a la forme d'un D. Beaucoup d'arcs associent au contraire plusieurs matériaux. Les arcs composites d'Asie sont faits de corne,

de bois et de tendon collés ensemble, et plusieurs peuples d'Amérique du Nord collaient une couche de tendon sur le dos d'un arc en bois.

Comment ça marche

Les deux faces d'un arc bandé travaillent en sens contraire. Le dos, tourné vers la cible, est étiré ; le ventre, tourné vers l'archer, est comprimé. Le bois résiste aux deux, si bien que l'effort fourni pour tirer s'accumule dans les branches sous forme d'énergie élastique, comme dans un ressort qu'on remonte. Un arc de chasse demande couramment une traction d'environ 180 à 270 newtons (40 à 60 livres) à pleine allonge, et les lourds arcs de guerre bien davantage.

L'if convient à l'arc simple parce que son tronc contient deux bois différents. L'aubier clair, sous l'écorce, supporte bien l'étirement, et le bois de cœur, plus sombre, supporte bien l'écrasement. Les facteurs d'arcs laissent donc une couche d'aubier au dos et du bois de cœur au ventre, comme le montre la coupe de la planche. Avec la plupart des autres essences, l'arc est taillé entièrement dans l'aubier ou entièrement dans le bois de cœur, et son dos suit un même cerne sur toute sa longueur.

Quand l'archer lâche la corde, les branches reviennent vers l'avant et la corde pousse la flèche. Toute l'énergie accumulée ne lui parvient pas, car les branches et la corde sont elles aussi en mouvement et en gardent une partie. Des branches légères qui plient régulièrement en gaspillent moins que des branches lourdes. Avec un arc en bois, la flèche part en général à 40 à 60 mètres par seconde.

La poussée est si brutale que la flèche fléchit et vibre en partant, en contournant la poignée de l'arc ; les archers parlent du paradoxe de l'archer. Pour qu'elle vole droit, sa raideur, qu'on appelle le spine, doit être adaptée à la puissance de l'arc, compte tenu de la longueur de la flèche et du poids de sa pointe, qui changent tous deux sa flexion. Les plumes, à l'arrière, freinent la flèche en arrière de son point d'équilibre, si bien que toute oscillation ramène la pointe dans l'axe du vol, comme les ailettes d'une fléchette. Une pointe plus lourde avance le point d'équilibre et stabilise le vol, mais elle fait aussi davantage fléchir le fût.

Comment le fabriquer

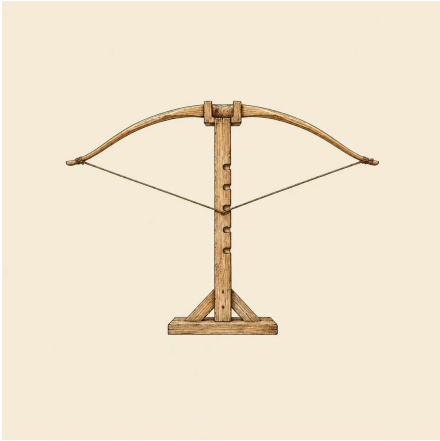
Un arc simple demande une hachette ou une plane, une râpe, un racloir, un couteau, une longue corde, un peson à ressort et un banc de tillering : un poteau vertical portant en haut un appui pour la poignée et, sur sa hauteur, une série d'encoches.

Choisir la douelle. Prenez une pièce de bois tenace et nerveux, à fil droit, sans nœuds ni torsion : if, oranger des Osages, orme, frêne, hickory ou érable. Fendez-la dans la bille plutôt que de la scier, pour que le fil coure sur toute la longueur. Bouchez les extrémités et laissez-la sécher lentement à l'abri pendant plusieurs mois, idéalement un an.

Préparer le dos. Le dos est la face qui était sous l'écorce. Sur la plupart des bois, retirez l'écorce et suivez un même cerne sur toute la longueur sans le trancher : un cerne coupé est l'endroit où l'arc cassera. Sur l'if, conservez une fine couche d'aubier.

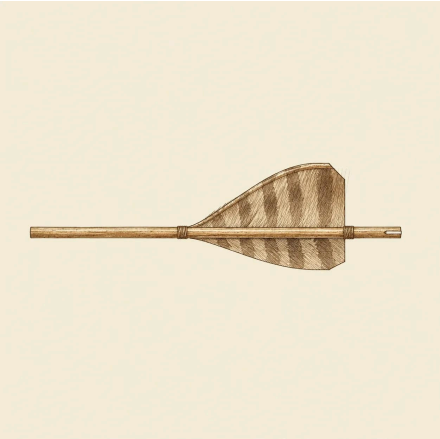
Dégrossir la forme. Tracez un axe, puis le contour : une poignée étroite et épaisse au milieu et des branches qui s'amincissent vers les pointes. Pour un arc long, la douelle mesure à peu près la taille de l'archer. Retirez du bois sur le ventre seulement, jusqu'à ce que chaque branche fléchisse un peu quand on pose la pointe au sol et qu'on pousse sur la poignée.

Équilibrer l'arc. Taillez des gorges pour la corde près des pointes, montez une corde longue et posez l'arc par sa poignée sur le banc. Descendez la corde d'une encoche à la fois, lisez la traction sur le peson et observez la courbe. Ne tirez jamais plus fort que la puissance visée, sous peine de surmener la douelle inachevée. Les deux branches doivent plier en arcs réguliers, sans zone raide ni pliure brusque. Laissez remonter la corde doucement et retirez l'arc du banc avant d'y toucher avec un outil : ne raclez jamais une branche sous charge. Raclez ensuite le ventre là où une branche est trop raide, quelques copeaux à la fois, et faites travailler l'arc une douzaine de fois entre deux passes. Arrêtez-vous un peu avant votre allonge complète et la puissance voulue. C'est l'étape la plus lente. Une courte zone qui plie plus que le reste, une charnière, encaisse trop d'effort : c'est là qu'un arc risque de se fendre.



Sur le banc, l'arc est tiré un peu plus à chaque étape, pour comparer la courbure des deux branches.

Faire la corde. Torsadez la corde en lin, en chanvre, en tendon ou en fil de polyester moderne, avec une boucle fixe à un bout et un nœud de bois à l'autre. Une fois l'arc bandé, la corde doit se tenir à environ une largeur de main de la poignée. Remettez l'arc bandé sur le banc avec sa corde définitive et tirez-le par étapes jusqu'à pleine allonge : les deux branches doivent toujours plier régulièrement et le peson indiquer la puissance prévue. N'enlevez les derniers copeaux que là où ce contrôle révèle une zone raide, chaque fois corde relâchée et arc retiré du banc.



Trois plumes de la même aile, collées puis ligaturées à chaque bout, tiennent la flèche dans sa trajectoire.

Faire les flèches. Coupez des rejets droits de cornouiller, de viorne ou de noisetier, ou fendez des fûts dans une bille bien droite. Redressez-les à la chaleur douce et raclez-les bien ronds. Triez-les par raideur, coupez-les à la même longueur et montez des pointes de même poids, pour que les flèches d'un même arc volent de la même façon. Faites chaque flèche assez longue pour votre allonge complète, la pointe restant en avant de l'arc à pleine allonge. Taillez une encoche pour la corde à l'arrière. À l'avant, ligaturez une pointe de pierre, d'os ou de métal avec du tendon et une colle comme le brai de bouleau, ou mettez une pointe mousse en bois pour l'entraînement. Collez trois plumes de la même aile le long du fût près de l'encoche, à intervalles égaux, et ligaturez leurs extrémités.

> **Sécurité.** Un arc est une arme, quelle que soit sa puissance. Ne visez jamais personne et ne tirez que sur un terrain doté d'une butte de tir, sans personne au-delà. Ne lâchez jamais une corde tendue sans flèche : l'énergie passe dans l'arc, qui peut casser et projeter des éclats. Portez des lunettes de protection pendant l'équilibrage et les essais, vérifiez avant chaque séance que l'arc, la corde, les fûts et les encoches des flèches ne sont pas fendus, et utilisez des flèches assez longues et assez raides pour l'arc. La poussière d'if est toxique et les autres poussières de bois peuvent nuire aux poumons et à la peau : évacuez la poussière à la source et portez un masque bien ajusté, muni d'un filtre adapté, quand vous râpez et poncez, même dehors, et prenez garde à la source de chaleur quand vous redressez les fûts. La chasse à l'arc est réglementée ou interdite dans beaucoup de pays.

Histoire et évolution

Arcs et flèches sont faits de bois, de tendon et de plumes, qui se conservent rarement ; les débuts du tir à l'arc se lisent donc dans les pointes de pierre. Dans la grotte de Sibudu, au KwaZulu-Natal, en Afrique du Sud, de petites pointes vieilles d'environ 64 000 ans portent des traces d'impact, des restes de sang et d'os, et des résidus de la

colle végétale qui les fixait à un fût, ce qui laisse penser qu'elles armaient des flèches. Des chercheurs ont proposé des pointes plus anciennes, d'environ 74 000 ans, à Shinfa-Metema 1 en Éthiopie, une interprétation que d'autres travaux doivent encore confirmer. En Europe, l'indice probable le plus ancien vient de la grotte Mandrin, dans la Drôme : des pointes de silex d'environ 54 000 ans, laissées par des humains modernes et trop petites pour avoir été lancées à la main.

Les plus anciens fûts de flèche connus, en pin, viennent de Stellmoor, près de Hambourg, et ont environ 12 000 ans. Le plus ancien arc complet, en orme, a été trouvé dans la tourbière de Holmegaard, au Danemark, et date d'environ 7000 av. J.-C. Ötzi, l'homme mort dans les Alpes il y a quelque 5 300 ans, portait une ébauche d'arc en if et un carquois en peau de cerf contenant 14 flèches ; deux seulement étaient terminées, avec une pointe de silex et des plumes fixées au brai de bouleau et à la fibre végétale.

Dans les steppes d'Asie et au Proche-Orient, les facteurs mirent au point l'arc composite, formé d'une fine âme de bois avec de la corne sur le ventre et du tendon sur le dos. Plus court qu'un arc simple de même puissance, il convenait aux archers en char et à cheval, et il arma les Scythes, les Huns, les Mongols et les Turcs ottomans.

Débandé, un arc composite se courbe vers l'avant, à l'opposé de l'archer ; le bander le retourne et stocke de l'énergie avant même la traction.

En Europe de l'Ouest, l'arc long en if servit les armées anglaises à Crécy en 1346 et à Azincourt en 1415. La *Mary Rose*, navire de guerre d'Henri VIII coulé en 1545, a livré 172 arcs longs, taillés chacun dans une seule pièce d'if ; les plus grands mesurent 2,11 m. Une arme à feu était plus lente à recharger, mais un soldat apprenait à s'en servir bien plus vite qu'on ne formait un archer ; aux XVIe et XVIIe siècles, les armes à feu chassèrent l'arc des champs de bataille européens. Il resta une arme de chasse dans de nombreuses régions du monde, et le tir à l'arc devint un sport, pratiqué aujourd'hui avec des arcs en fibre de verre et en carbone, et avec des arcs à poulies.

Chiffres clés

Pointes de flèche anciennes
Il y a environ 64 000 ans, grotte de Sibudu, Afrique du Sud

Plus ancien arc complet
Holmegaard, Danemark, en orme, vers 7000 av. J.-C.

Équipement d'Ötzi
Ébauche d'arc en if de 1,82 m, 14 flèches dont 2 terminées

Arcs longs de la Mary Rose (coulée en 1545)
172 retrouvés, puissance estimée entre 65 et 175 livres (290 à 780 N)

Sources

1. Indications of bow and stone-tipped arrow use 64 000 years ago in KwaZulu-Natal, South Africa · Antiquity (Lombard and Phillipson, 2010) https://resolve.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/abs/indications-of-bow-and-stonetipped-arrow-use-64-000-years-ago-in-kwazulunatal-south-africa/89AF638BE5E64CEAC63363EFDD4D5E8F
2. Surviving a volcanic supereruption may have facilitated human dispersal out of Africa · University of Texas at Austin https://news.utexas.edu/2024/03/20/surviving-a-volcanic-supereruption-may-have-facilitated-human-dispersal-out-of-africa/
3. Earliest likely evidence for bow and arrow use in Europe, 54,000 years ago, found in southern France · Popular Archaeology https://popular-archaeology.com/article/earliest-likely-evidence-for-bow-and-arrow-use-in-europe-54000-years-ago-found-in-southern-france/
4. How old is the bow and arrow? · World Archery https://www.worldarchery.sport/news/166330/
5. Ötzi's equipment · South Tyrol Museum of Archaeology https://www.iceman.it/en/equipment/
6. The longbows of the Mary Rose · Mary Rose Trust https://maryrose.org/ship/bows1.htm
7. Standardised Equipment or Specialist Groups? The Role of Archery Aboard Mary Rose · University of Southampton (Parkes, PhD thesis, 2024) https://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/500151/
8. On the Mechanics of the Bow and Arrow · Rijksuniversiteit Groningen (Kooi, PhD thesis, 1983) https://www.bio.vu.nl/thb/users/kooi/thesis.pdf

Faits vérifiés le 2026-10-12

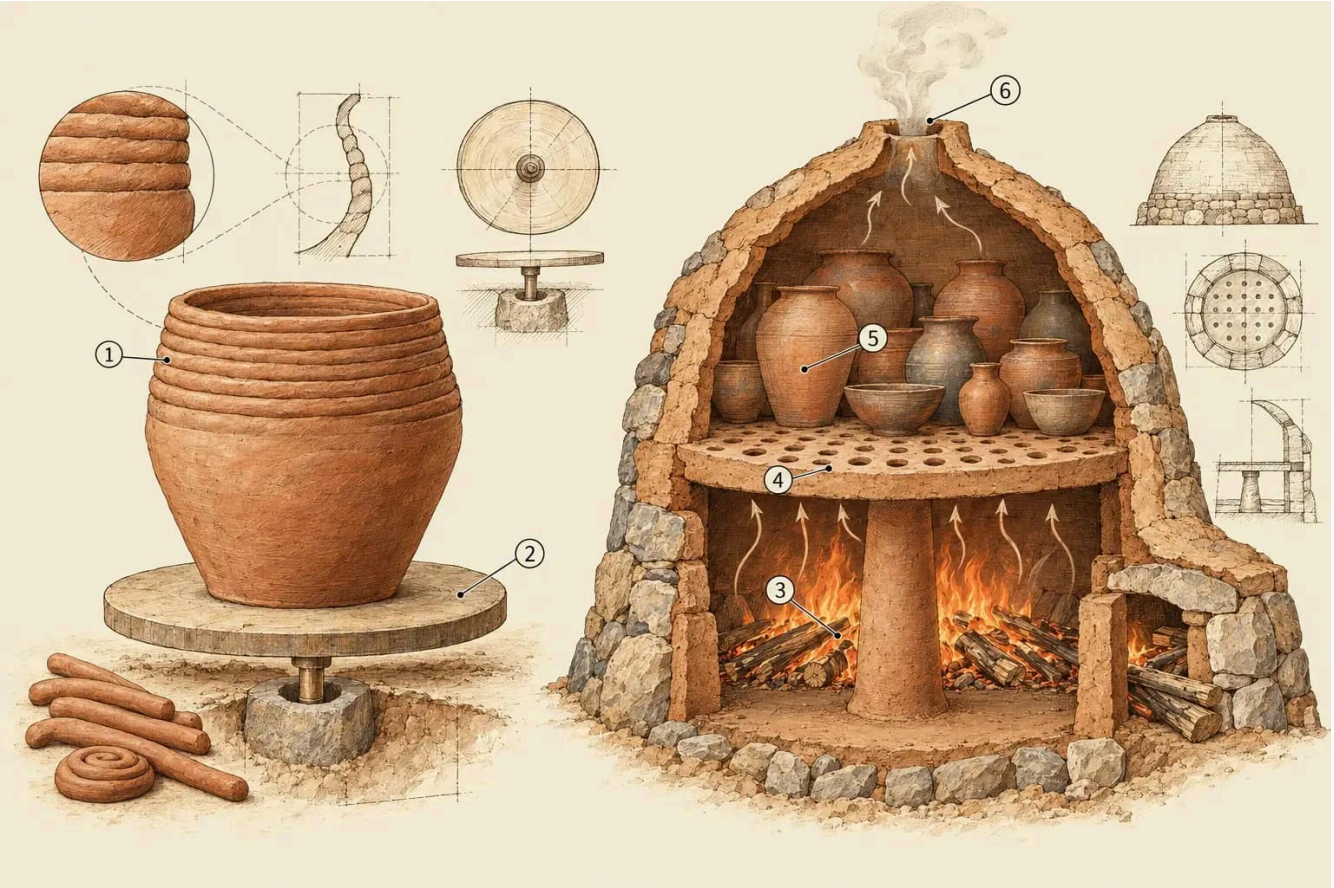
Céramique

L'argile changée en pierre par le feu

il y a 18 000 ans · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9)

Mène à : Bière (p. 79), Bronze (p. 125), Fromage (p. 57), Distillation (p. 176), Eau potable (p. 35), Teinture (p. 70), Verre (p. 134), Mesures et étalons (p. 129), Papier (p. 172), Tour de potier (p. 121), Salaison (p. 48), Savon (p. 95), Écriture (p. 87)



1 Colombins d'argile 2 Tournette 3 Foyer 4 Sole perforée 5 Pots dans le laboratoire 6 Évent

La céramique est de l'argile façonnée humide puis cuite jusqu'à devenir, de façon irréversible, une matière dure comme la pierre. Des chasseurs-cueilleurs du sud de la Chine fabriquaient des pots d'argile, sans doute pour cuisiner, il y a environ 20 000 ans, bien avant l'agriculture.

Ce que c'est

La céramique regroupe tous les objets d'argile durcis par le feu, des marmites et des jarres aux lampes et aux tuiles. Les potiers classent leurs productions en trois groupes selon la pâte et la température de cuisson : la terre cuite, poreuse, le grès, compact, et la porcelaine, blanche et vitrifiée.

Un pot d'argile grossière bien dégraissée peut chauffer doucement sur le feu, ce qui permet de faire bouillir et mijoter, et des jarres couvertes, rangées au sec, mettent le grain à l'abri des souris.

La planche montre comment on façonne et cuit un pot : monté à la main avec des boudins d'argile, puis cuit dans un four simple à tirage vertical.

Comment ça marche

L'argile est faite de cristaux plats microscopiques, surtout des silicates d'aluminium. Mouillées, ces paillettes glissent les unes sur les autres sur de fines pellicules d'eau : l'argile se modèle et garde sa forme. En séchant, les paillettes se tassent et le pot rétrécit de quelques pour cent. L'argile sèche est ferme, mais redeviendrait boue sous la pluie.

Un pot japonais de l'époque Jōmon, décoré en roulant une cordelette torsadée sur l'argile humide.

Au feu, entre 450 et 650 °C environ selon l'argile, l'eau liée à l'intérieur des cristaux s'en va et leur structure se défait : l'argile ne pourra plus jamais être ramollie par l'eau. Plus chaud encore, les grains commencent à se souder à leurs points de contact. La terre cuite reste poreuse. Aux températures du grès, une partie de la pâte fond en un verre qui bouche les pores, et le pot tient l'eau sans émail. La porcelaine, pâte blanche riche en kaolin cuite à haute température, devient dure et légèrement translucide.

Une cuisson en meule : les pots sont enfouis dans le combustible et cuits à même le sol, sans four.

Les potiers mélangent à l'argile un dégraissant : sable, coquillages broyés ou vieux pots pilés. Il ouvre la pâte pour laisser sortir la vapeur et limite les fissures au séchage et à la cuisson.

Les premiers pots étaient cuits dans des feux à l'air libre ou des fosses peu profondes, entre 600 et 900 °C. Un four retient la chaleur. Dans le four à tirage vertical de la planche, le feu brûle dans un foyer en bas ; les gaz chauds montent par les trous d'une sole d'argile, passent autour des pots empilés et sortent par un évent au sommet. Les pots ne baignent plus dans le combustible : la chaleur est plus égale, plus facile à conduire, et moins de pièces se fendent.

Comment la faire

On peut produire une bonne terre cuite avec de l'argile prise dans le sol, quelques outils simples et un feu de bois. Voici les grandes étapes.

Trouver et préparer l'argile. Roulez un boudin fin et pliez-le en anneau : s'il ne se fend pas, l'argile est assez plastique. Délayez-la, laissez les pierres se déposer, récupérez le dessus et laissez-le sécher jusqu'à pouvoir le pétrir. Incorporez du sable ou de la terre cuite pilée, environ un quart du volume pour commencer, et cuisez quelques petites pièces d'essai pour ajuster le mélange.

Monter aux colombins. Aplatissez un disque pour le fond. Roulez des colombins gros comme un doigt et posez-les l'un sur l'autre, en pinçant et en lissant chacun sur le précédent, dedans et dehors. Travaillez sur une planchette ou une tournette pour faire pivoter le pot. Amincissez et régularisez les parois avec une batte de bois contre un galet tenu à l'intérieur.

Sécher lentement. Tenez le pot à l'abri du soleil et du vent pendant une semaine ou plus. À consistance de cuir, lustrez-le au galet. Ne le cuisez que lorsqu'il est parfaitement sec et n'est plus froid au toucher.

Cuire. Réchauffez les pots près du feu une heure ou deux en les tournant. Posez-les ensuite sur des braises, couvrez-les de bois et de bouse, et montez le feu pendant plusieurs heures. Laissez tout refroidir lentement dans

les cendres avant de sortir les pots.

> **Sécurité.** Cuisez uniquement en plein air, loin des bâtiments : dégagez le terrain, gardez de l'eau à portée de main, surveillez le vent et restez hors de la fumée. Une argile encore humide peut éclater et projeter des éclats coupants, et les cendres restent brûlantes pendant des heures. La poussière d'argile sèche contient de la silice fine qui abîme les poumons : nettoyez à l'humide plutôt qu'au balai. Considérez ces pots comme expérimentaux et tenez-les à l'écart des aliments tant que l'argile et les pièces cuites n'ont pas été analysées. N'utilisez jamais d'émail de composition inconnue : le plomb peut migrer dans les aliments.

Histoire et évolution

L'argile cuite est plus ancienne que les pots. À Dolní Věstonice, dans l'actuelle République tchèque, on modelait entre 29 000 et 25 000 av. J.-C. environ des figurines d'argile cuite, mais pas de récipients.

Les plus anciens pots connus viennent de la grotte de Xianrendong, dans la province chinoise du Jiangxi. En 2012, une équipe menée par Wu Xiaohong et Ofer Bar-Yosef a daté les premiers tessons, dont certains portent des traces de suie et de brûlure qui évoquent la cuisson, d'environ 20 000 à 19 000 ans, au plus fort de la dernière glaciation. Certains jugent les couches de la grotte trop remaniées pour conclure, mais d'autres poteries d'Asie orientale confirment que des chasseurs-cueilleurs de l'âge glaciaire faisaient des pots. À Ōdai Yamamoto, dans le nord du Japon, des tessons portant des restes d'aliments carbonisés ont été datés d'environ 16 500 à 15 000 ans selon les études. Au Proche-Orient, c'est l'inverse : les premiers villages d'agriculteurs se sont passés de poterie pendant plus de deux mille ans.

Le plus ancien four de potier connu au Proche-Orient, à Yarim Tepe dans le nord de l'Irak, date d'environ 6000 av. J.-C. ou d'un peu avant. Des tournettes lentes aident les potiers du Proche-Orient à monter leurs pots aux colombins vers 3500 av. J.-C., et le tour rapide, assez lourd pour continuer à tourner pendant que le potier tire un pot d'une motte d'argile, suit au IIIe millénaire av. J.-C.

Les fours chinois atteignent environ 1 000 °C avant 2000 av. J.-C., et les fours-dragons, qui grimpent à flanc de colline, montent jusqu'à 1 300 °C. Cela rend possible le grès puis, dès la dynastie Tang (618-907), la porcelaine blanche.

Un tour de potier ancien : une lourde girelle de bois qui pivote dans une pierre creusée.

Chiffres clés

Plus anciens pots connus
Grotte de Xianrendong, Chine, il y a env. 20 000 à 19 000 ans

Plus ancien four de potier connu au Proche-Orient
Yarim Tepe, Irak, v. 6000 av. J.-C. ou un peu avant

Point de non-retour
Vers 450 à 650 °C selon l'argile : elle ne se délite plus dans l'eau

Températures de cuisson
Terre cuite 600–1 200 °C, grès 1 100–1 300 °C, porcelaine jusqu'à 1 400 °C

Sources

1. Pottery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Pottery
2. Kiln · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Kiln
3. Potter's wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Potter%27s_wheel
4. Oldest pottery comes from Chinese cave · Science News https://sciencenews.org/?p=8772
5. The First Pots (Top 10 Discoveries of 2012) · Archaeology Magazine https://archaeology.org/issues/january-february-2013/collection/top-10-2012-neolithic-china-pottery/top-10-discoveries-of-2012/
6. Firing Clay: The Lowdown on the Ceramic Firing Process · Ceramic Arts Network https://ceramicartsnetwork.org/daily/article/Firing-Clay-The-Lowdown-on-the-Ceramic-Firing-Process
7. Quartz Inversion · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/quartz+inversion
8. Water Smoking · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/water+smoking
9. Red heat · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Red_heat

Faits vérifiés le 2026-10-11

Pain

Grain moulu, eau et chaleur

il y a 12 400 ans · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9)

Mène à : Bière (p. 79)

1 Meule à va-et-vient 2 Pâte levée 3 Voûte du four 4 Sole 5 Braises 6 Pelle à enfourner

Le pain est une pâte de grain moulu et d'eau, souvent levée, cuite jusqu'à ce qu'elle prenne. Des chasseurs-cueilleurs de Jordanie cuisaient déjà une sorte de galette il y a environ 14 400 ans, avant que quiconque cultive les céréales.

Ce que c'est

Le pain est de la farine mêlée d'eau, façonnée puis cuite à la chaleur sèche. On y ajoute presque toujours du sel. La plupart des pains sont aussi levés : de petites bulles de gaz produites par la levure ou par un levain les font gonfler et leur donnent une mie aérée. Les galettes sans levain sautent cette étape et cuisent en quelques minutes sur une pierre chaude ou contre la paroi d'un four.

Le grain cuit se conserve mal et le grain cru se digère difficilement. Le pain en fait un aliment facile à emporter, qui se garde plusieurs jours ; dans bien des régimes, il fournit l'essentiel des calories. La planche suit l'ordre ancien : grain écrasé sur une meule à va-et-vient, pâte mise à lever dans un pétrin de bois, miches cuites sur la sole d'un four à voûte.

Engrain, amidonnier et orge, les céréales des premiers pains du Proche-Orient.

Comment ça marche

La farine de blé contient deux familles de protéines, les gluténines et les gliadines. Quand on ajoute de l'eau et qu'on pétrit, elles s'unissent en gluten, un réseau élastique qui s'étire et retient le gaz. Les protéines du seigle et de l'orge ne forment pas un tel réseau ; la mie de seigle tient surtout par son amidon et ses gommes, d'où des pains plus denses.

Les levures, des champignons unicellulaires présents sur le grain et dans l'air, se nourrissent des sucres libérés par l'amidon. Elles dégagent du gaz carbonique et un peu d'alcool. Le gaz s'accumule dans de minuscules alvéoles retenues par le gluten, et la pâte gonfle. Un levain associe des levures sauvages à des bactéries lactiques, qui donnent un goût acidulé et aident le pain à se conserver.

Au four, le gaz et l'eau de la pâte se dilatent, et la miche monte vite pendant les premières minutes. Entre 60 et 80 °C environ, l'amidon absorbe l'eau et gonfle, les protéines se figent : la mousse molle devient une mie ferme. En surface, là où la pâte sèche et chauffe bien davantage, sucres et protéines réagissent et brunissent en croûte. Le pain est cuit quand son cœur approche 100 °C.

Un four à bois cuit grâce à la chaleur accumulée. Le feu brûle jusqu'à ce que la maçonnerie soit chaude à cœur, puis on écarte ou on retire les braises et on enfourne à la pelle. Les murs épais rendent leur chaleur pendant une heure ou plus.

Comment le faire

Il faut du blé, de quoi le moudre, un levain et un four. Les étapes ci-dessous donnent deux pains de froment au levain ; le seigle et l'orge demandent d'autres recettes.

Faire la farine. Écrasez du blé ou de l'épeautre, propre et sec, entre deux pierres. Tamisez le gros son pour un pain plus clair.

Lancer un levain. Mélangez dans un bocal le même poids de farine complète et d'eau, couvrez sans fermer et gardez au chaud. Chaque jour, gardez-en environ 100 g, jetez le reste et nourrissez avec 100 g de farine et 100 g d'eau, entre 20 et 27 °C. Au bout de cinq à dix jours, le levain doit buller et doubler de volume quelques heures après chaque rafraîchi.

Pétrir. Pour deux pains, comptez 1 kg de farine, 650 à 700 g d'eau, 20 g de sel et environ 200 g de levain actif. Pétrissez dix minutes, jusqu'à obtenir une pâte lisse et élastique.

Laisser lever. Laissez la pâte couverte de quatre à huit heures selon la chaleur, partagez-la en deux, façonnez deux boules bien serrées et laissez-les lever de nouveau dans un panier fariné ou un linge, une à trois heures, jusqu'à ce qu'elles aient pris environ moitié de volume et qu'une empreinte du doigt remonte lentement.

Chauffer le four. Brûlez du bois dur bien sec dans un four d'argile ou de brique pendant une à deux heures, jusqu'à ce que la suie de la voûte ait brûlé et que la maçonnerie blanchisse. Retirez les braises, passez un linge humide sur la sole et enfournez. Comptez environ 40 minutes ; le dessous doit sonner creux.

> **Sécurité.** La sole et la voûte brûlent gravement : prenez une longue pelle et des gants épais, sans jamais passer la tête dans le four. Travaillez en plein air, car un feu qui couve dans une pièce fermée dégage du monoxyde de carbone. Jetez tout grain moisi ou portant des ergots noirs en forme de corne, qui sont toxiques. Gardez le bocal de levain propre ; à la moindre moisissure, jetez tout le levain et ébouillantez le bocal.

Histoire et évolution

En 2018, une équipe dirigée par Amaia Arranz-Otaegui a décrit des miettes carbonisées trouvées dans deux foyers de Shubayqa 1, un site du nord-est de la Jordanie occupé par des chasseurs-cueilleurs natoufiens il y a environ 14 400 ans. Le microscope électronique y a révélé une sorte de galette de céréales sauvages, comme l'engrain, et de tubercules de scirpe broyés, quelque 4 000 ans avant l'agriculture dans la région.

Un pain carbonisé, enseveli par le Vésuve en 79 apr. J.-C., incisé en huit parts avant la cuisson.

L'Égypte ancienne faisait son pain avec de l'amidonnier, qu'il fallait piler pour libérer le grain de ses balles avant de le moudre sur des meules à va-et-vient. Au microscope, l'archéobotaniste Delwen Samuel a trouvé des cellules de levure conservées dans des pains desséchés d'environ 1400 av. J.-C., la plus ancienne preuve directe de levure en boulangerie.

À Rome, la boulangerie devient un métier. Les archéologues ont recensé 39 boulangeries à Pompéi, avec leurs meules de pierre tournées par des ânes et leurs fours à voûte, et des pains carbonisés lors de l'éruption de 79 nous sont parvenus. Pline l'Ancien rapporte que les Gaulois et les Ibères utilisaient l'écume de la bière pour obtenir un pain plus léger.

Pendant des siècles, la plupart des gens ont mangé des pains grossiers de seigle, d'orge ou de méteil ; le pain blanc de froment était un luxe. Au XIXe siècle, les moulins à cylindres rendent la farine blanche bon marché, et la levure de boulanger industrielle remplace la pâte gardée de la veille et la levure de bière. En 1961, le procédé Chorleywood, mis au point en Grande-Bretagne, remplace la longue première fermentation par quelques minutes de pétrissage mécanique intense ; la majeure partie du pain industriel britannique est encore faite ainsi.

Un moulin pompéien : la meule supérieure en sablier tourne sur un cône fixe et écrase le grain entre les deux.

Chiffres clés

Plus ancien pain connu

Shubayqa 1, Jordanie, il y a env. 14 400 ans

Plus ancienne preuve directe de levure dans le pain

Pains égyptiens, v. 1400 av. J.-C.

Pâte type

100 parts de farine, 60 à 75 d'eau, environ 2 de sel

Cuisson

Environ 40 min à 220–250 °C pour une miche d'environ 900 g

Sources

1. Bread · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bread
2. Flatbread Baked 14,400 Years Ago Found in Jordan · Sci.News https://www.sci.news/archaeology/natufian-flatbread-jordan-06210.html
3. 3500 year old bread and beer from the New Kingdom Egypt · UCL Researchers in Museums https://blogs.ucl.ac.uk/researchers-in-museums/2017/02/09/3500-year-old-bread-and-beer-from-the-new-kingdom-egypt
4. Digging Deeper into Pompeii's Past · Archaeology Magazine https://archaeology.org/issues/july-august-2019/collection/pompeii-industry-bakeries/digging-deeper-into-pompeiis-past/
5. Adjusting Bake Times in New Ovens · BAKERpedia https://bakerpedia.com/?p=39416
6. Yeast Kill · BAKERpedia https://bakerpedia.com/processes/yeast-kill/
7. Relating Bread Baking Process Operating Conditions to the Product Quality: a Modelling Approach · Chemical Engineering Transactions https://doi.org/10.3303/CET1439289

Faits vérifiés le 2026-10-11

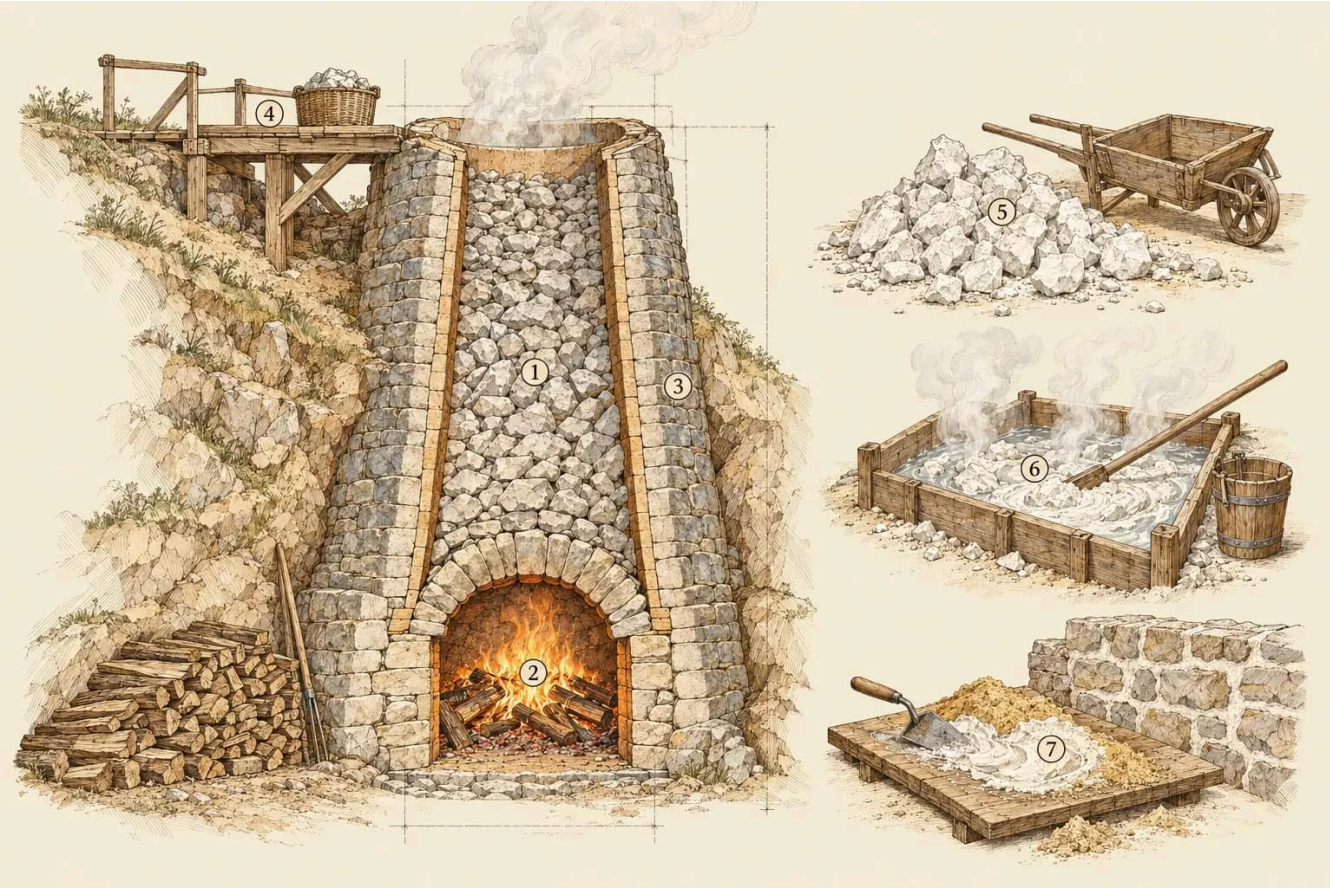
Chaux et mortier de chaux

La pierre cuite qui redevient pierre

il y a 10 000 ans · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9), Outils de pierre (p. 5)

Mène à : Aqueduc (p. 147), Ciment Portland (p. 259), Béton romain (p. 167)



1 Charge de calcaire 2 Feu de bois sous la voûte de pierres 3 Paroi épaisse du four et son chemisage
4 Plateforme de chargement au sommet 5 Chaux vive défournée 6 Fosse d'extinction : eau, vapeur et pâte
7 Mortier de pâte et de sable, posé dans un mur

La chaux, c'est du calcaire cuit dans un four jusqu'à ce qu'il rejette son gaz carbonique, puis éteint à l'eau en une pâte ou une poudre blanche. Mêlée à du sable, elle sert de mortier et d'enduit depuis des millénaires, et elle durcit en reprenant à l'air ce gaz carbonique pour redevenir pierre.

Ce que c’est

La chaux est un liant blanc tiré du calcaire, de la craie ou des coquillages, qui sont tous du carbonate de calcium. Cuite, la pierre devient chaux vive ; avec de l’eau, la chaux vive devient chaux éteinte, en pâte molle ou en poudre sèche. Mêlée à du sable, la chaux éteinte fait le mortier qui lie pierres et briques, et l’enduit des murs et des sols.

Une fois en place, le mortier reprend lentement le gaz carbonique de l’air et redevient du carbonate de calcium, la matière d’où il est parti. Les maçons appellent cet aller-retour le cycle de la chaux ; la planche le suit du four, à gauche, jusqu’au mur, à droite.

Comment ça marche

La cuisson. Au-delà de 700 °C environ, et rapidement vers 900 °C, le carbonate de calcium se décompose en oxyde de calcium et en gaz carbonique, qui part avec la fumée. Un calcaire pur perd 44 % de son poids, mais les blocs gardent leur forme et sortent légers, poreux et crayeux. Vitruve avait remarqué cette perte et l'estimait à un tiers.

Dans un four traditionnel, le chaufournier monte une voûte de grosses pierres au-dessus du foyer, puis remplit la cuve de morceaux de plus en plus petits. On entretient le feu par la gueule du bas pendant deux ou trois jours. Caton, vers 160 av. J.-C., donne les signes d'une cuisson achevée : les pierres du haut sont cuites à cœur, la charge s'affaisse par le bas et la flamme sort moins fumeuse. Le four refroidit ensuite plusieurs jours avant d'être vidé.

L'extinction. La chaux vive réagit avec l'eau pour former de l'hydroxyde de calcium et dégage beaucoup de chaleur. L'eau peut bouillir, et les blocs gonflent puis éclatent en une masse blanche très fine. Avec beaucoup d'eau on obtient de la pâte de chaux ; avec juste ce qu'il faut, une poudre sèche, la chaux hydratée vendue en sacs. La pâte s'améliore en vieillissant : jusqu'au milieu du XIXe siècle, on la laissait mûrir dans une fosse ou une caisse de bois de quelques semaines à un an, à couvert pour que l'air ne la durcisse pas.

L'extinction : les blocs gonflent, se fendent et s'effondrent pendant que l'eau chauffe.

La prise. Dans le mur, le sable fait le corps du mortier et la chaux remplit les vides entre les grains. À mesure que l'eau s'évapore, l'hydroxyde de calcium capte le gaz carbonique de l'air et redevient carbonate de calcium. Cette carbonatation commence en surface et progresse lentement vers l'intérieur. Un mortier qui sèche trop vite reste faible.

Un mortier de chaux pure est en général plus tendre et plus perméable que les pierres ou les briques qu'il lie : le mur peut se tasser légèrement et continue de sécher par ses joints. Un calcaire chargé d'argile donne une chaux hydraulique, qui prend aussi sous l'eau.

Comment le fabriquer

Achetez de la chaux vive en morceaux chez un fournisseur pour la restauration du bâti, éteignez-la, puis gâchez le mortier et montez un petit muret de jardin en pierres. Avec de la pâte de chaux toute prête, sautez l'extinction et passez directement au gâchage.

Éteindre la chaux. Remplissez à moitié d'eau un bac en acier. Avec lunettes, gants et manches longues, versez la chaux vive dans l'eau peu à peu, jamais l'eau sur la chaux, et reculez pendant qu'elle chauffe. Remuez avec une longue pagaie de bois. Une fois refroidie, passez-la au tamis dans un bac à couvercle, laissez la pâte se déposer sous quelques centimètres d'eau et attendez au moins quelques semaines.

Gâcher le mortier. Prenez un sable propre et anguleux, aux grains de toutes tailles : un volume de pâte pour trois de sable. Battez et hachez longtemps le mélange au rabot ou à la pelle en ajoutant le moins d'eau possible. Un long travail rend le mortier de chaux plastique et liant ; l'eau en trop le fait se rétracter et fissurer.

Mise en œuvre et cure. Ne maçonnez que par 5 °C au moins et en hausse, sans gel annoncé pendant plusieurs semaines. Humidifiez les pierres pour qu'elles ne boivent pas l'eau des joints. Posez chaque pierre sur un lit de mortier et serrez bien les joints. Gardez l'ouvrage humide et à l'ombre sous une toile de jute au moins une semaine, brumisez-le quand il pâlit et couvrez-le de bâches isolantes si le gel menace. Ne séchez jamais un ouvrage à la chaux avec un chauffage.

Le gâchage à la main : le rabot, une houe percée de trous, fait entrer la pâte dans le sable.

> **Sécurité.** La chaux vive et la chaux éteinte sont caustiques : elles brûlent la peau et peuvent rendre aveugle. Portez des lunettes étanches, des gants, des manches longues, des bottes et un masque anti-poussière pour la poudre. En cas de projection dans les yeux, rincez aussitôt à grande eau claire, paupières ouvertes, pendant au moins 15 minutes, puis consultez un médecin. L'extinction peut faire bouillir et gicler l'eau, et de la chaux vive au contact de l'humidité a déjà mis le feu à du bois et de la paille : gardez-la au sec, fermée et loin de tout ce qui brûle, et ne la mouillez jamais dans un récipient clos. Ne construisez pas de four sans autorisation locale ni aide expérimentée, tenez-vous loin du sommet pendant la cuisson et ne montez jamais sur un four encore chaud ni dedans. Éloignez les enfants.

Histoire et évolution

La plus ancienne chaux cuite vient de chasseurs-cueilleurs du Levant : dans le Sinaï, il y a environ 16 000 ans, elle semble avoir servi à fixer de petites lames de silex sur leur manche. À Nahal Ein Gev II, près du lac de Tibériade, huit personnes ont été enterrées il y a environ 12 000 ans sous une couche d'enduit de chaux épaisse d'une quarantaine de centimètres : on fabriquait donc déjà la chaux en quantité.

Dans les premiers villages d'agriculteurs, à partir d'il y a environ 10 000 ans, l'enduit de chaux recouvre sols et murs sur de nombreux sites, et un four creusé dans le sol à Nesher-Ramla, en Israël, remonte à environ 10 400 ans. À Aïn Ghazal, près d'Amman, on a modelé 32 statues et bustes en chaux sur des armatures de roseaux ; les datations au radiocarbone calibrées les placent vers 7700 à 7500 av. J.-C., alors que des publications plus anciennes donnent environ 6700 à 6500 av. J.-C. en années non calibrées.

Une statue d'Aïn Ghazal : de la chaux modelée sur des bottes de roseaux liées de ficelle.

Les auteurs romains ont laissé des consignes pratiques. Le four de Caton mesurait 10 pieds de large, 20 de haut et 3 au sommet. Vitruve conseillait trois parts de sable de carrière pour une de chaux, ou deux de sable de rivière ou de mer.

Après Rome, bien des mortiers sont faits de pâte de chaux et de sable du pays, à peu près un pour trois ; d'autres sont des mortiers à chaud, où la chaux vive s'éteint dans le sable humide, et les recettes varient d'une région à l'autre. La chaux vive est éteinte sur le chantier jusqu'au milieu du XIXe siècle. Le ciment Portland, breveté en Grande-Bretagne en 1824, prend peu à peu le relais, et dans les années 1930 la plupart des maçons américains en mettent dans leur mortier. Les artisans de la restauration sont revenus à la chaux pour le bâti ancien, car un mortier de ciment dur et dense peut retenir l'humidité dans la maçonnerie et accélérer la dégradation de la pierre.

Chiffres clés

Température de cuisson

Environ 900 °C ; la transformation commence vers 700 °C

Poids perdu au four

44 % pour un calcaire pur ; Vitruve l'estimait à un tiers

Mortier traditionnel

1 volume de pâte de chaux pour 3 de sable

Chaleur de l'extinction

La chaux vive au contact de l'humidité a déjà atteint 800 °C et enflammé bois et paille

Plus ancien enduit de chaux en grande quantité

Nahal Ein Gev II, Israël, il y a environ 12 000 ans

Sources

1. Lime plaster cover of the dead 12,000 years ago: new evidence for the origins of lime plaster technology (Friesem, Abadi, Shaham and Grosman, Evolutionary Human Sciences, 2019) · Cambridge University Press, via PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10427327/
2. A 10,400-year-old sunken lime kiln from the Early Pre-Pottery Neolithic B at the Nesher-Ramla quarry (el-Khirbe), Israel (Toffolo et al., 2017) · Journal of Archaeological Science: Reports, record at CENIEH https://investigacion.cenieh.es/documentos/65872833e6e23719147fb5c7?lang=fr
3. 'Ain Ghazal "Monumental" Figures: A Stylistic Analysis (Denise Schmandt-Besserat) · University of Texas at Austin https://sites.utexas.edu/dsb/ain-ghazal/ain-ghazal-monumental-figures-a-stylistic-analysis/
4. Lime Plaster Statue from Ain Ghazal · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/image/8522/lime-plaster-statue-from-ain-ghazal/
5. Cato, On Agriculture, chapters 1–52 (chapters 16 and 38: the lime kiln), translated by W. D. Hooper and H. B. Ash · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Cato/De_Agricultura/A*.html
6. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book II, chapters 4–5 (sand and lime), translated by Joseph Gwilt · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/2*.html
7. Introduction to lime: lime and its production · Tŷ-Mawr Lime https://lime.org.uk/knowledge-base/introduction-to-lime-lime-and-its-production
8. Some dos and don'ts in the use of lime mortars · Building Limes Forum https://www.buildinglimesforum.org.uk/some-dos-and-donts-in-the-use-of-lime-mortars/
9. Technical Advice Guide: Introduction to Lime in Traditional Buildings · Scottish Lime Centre Trust https://scotlime.org/documents/15/Technical_Advice_Guide_Introduction_to_Lime_in_Traditional_Buildings_1.pdf
10. Preservation Brief 2: Repointing Mortar Joints in Historic Masonry Buildings (Mack and Speweik, 1998) · U.S. National Park Service https://www.nps.gov/orgs/1739/upload/preservation-brief-02-repointing.pdf
11. A case study in lime production no. 1: traditional batch techniques at Chenkumbi, Malawi · Practical Action https://kolibri.teacherinabox.org.au/modules/en-practical_action/Construction/Cement%20and%20binders/KnO-100090_Lime_production_traditional_Chenkumbi_Malawi.pdf
12. Lime production: traditional batch techniques in Patarra, Costa Rica · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Construction/Cement%20and%20binders/KnO-100089_Lime%20production%20-%20Traditional%20batch%20techniques%20in%20Patarra%20%20Costa%20Rica,%20case%20study/page2.html
13. Calcium oxide: chemical datasheet (with NIOSH Pocket Guide first aid) · CAMEO Chemicals, U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/311

Faits vérifiés le 2026-10-13

Eau potable

Puiser, décanter, filtrer, faire bouillir

v. 8 400 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9), Céramique (p. 23), Corde & cordage (p. 13)

Mène à : Hygiène et antisepsie (p. 301), Réhydratation orale (p. 377)

1 Puits cuvelé de pierre 2 Margelle, couvercle et treuil 3 Dalle en pente et rigole 4 Jarre de décantation 5 Lit de sable fin et sa couche biologique 6 Gravier et tuyau de sortie 7 Marmite à gros bouillons

Une eau sûre commence par une source protégée, par exemple un puits maçonné et couvert, creusé en amont et loin des latrines et des enclos à bêtes. Quand l'eau est douteuse, la décantation, la filtration lente sur sable et l'ébullition éliminent ou tuent la plupart des germes de la diarrhée, du choléra et de la typhoïde, mais aucune ne retire les produits chimiques dissous.

Ce que c’est

L’eau qui rend malade a souvent l’air propre. Le danger tient à des bactéries, des virus, des protozoaires et des œufs de vers presque tous issus d’excréments humains ou animaux. Le choléra, la typhoïde, la dysenterie et les diarrhées qui tuent encore de jeunes enfants se transmettent ainsi.

Une eau sûre tient à une suite d’habitudes : une source tenue propre, une eau douteuse clarifiée par décantation ou filtration lente sur sable puis bouillie, et un stockage soigné, car un gobelet ou une main sale suffit à la souiller de nouveau.

Comment ça marche

La pluie entraîne les excréments des champs et des cours vers les ruisseaux et les mares. Le liquide d'une fosse de latrines s'infiltre dans le sol jusqu'aux nappes peu profondes, plus vite à travers le gravier ou le calcaire fissuré qu'à travers l'argile.

L'eau souterraine est en général plus propre que l'eau de surface, car le sol retient particules et microbes. Un puits garde cet avantage si son cuvelage maçonné dans le haut, sa margelle, son couvercle et sa dalle en pente empêchent le ruissellement et les éclaboussures d'entrer dans le puits.

Beaucoup de germes s'accrochent aux particules de limon et d'argile. Quand une eau trouble repose quelques heures, ces particules tombent au fond et en emportent une partie. La décantation seule ne rend pas l'eau potable.

Un filtre lent à sable est avant tout un milieu vivant. L'eau y descend de quelques dixièmes de mètre par heure à travers du sable fin. Au fil des premières semaines, une couche de bactéries, d'algues et d'organismes minuscules s'installe dans les premiers centimètres. Les particules s'y collent, les microbes de cette couche se nourrissent d'une bonne partie des germes retenus, et d'autres meurent avant d'avoir traversé. Une partie des bactéries et beaucoup de virus passent pourtant : le filtre améliore l'eau sans la rendre sûre à lui seul.

L'ébullition tue par la chaleur. Selon l'OMS, porter l'eau à gros bouillons suffit à inactiver les bactéries, virus et protozoaires pathogènes. La chaleur ne fait rien contre les produits chimiques.

Comment s'y prendre

Choisir et protéger la source. Préférez une nappe protégée ou une source captée, puis l'eau de pluie d'un toit propre, et seulement en dernier les rivières et les mares. Placez le puits en amont de toute latrine, à 30 m au moins et davantage dans le gravier ou la roche fissurée, et tenez les bêtes à distance par une clôture à environ 15 m, comme le suggère l'OMS. Lavez le linge et abreuvez le bétail en aval.

Creuser et cuveler le puits. Creusez un puits d'au moins un mètre de diamètre et garnissez-le de pierre ou de brique à mesure que vous descendez. L'OMS recommande de rendre étanches au moins les 3 premiers mètres, joints au mortier, tandis que le cuvelage sous le niveau de l'eau reste ouvert pour laisser entrer la nappe. Montez une margelle, posez un couvercle et construisez autour une dalle étanche d'au moins 1 m de large, raccordée à la margelle et en pente vers une rigole qui évacue l'eau répandue vers l'aval. Réservez une corde et un seau au puits et ne les posez jamais par terre. Un puits neuf ou inondé doit être désinfecté et, si possible, son eau analysée ; en attendant, faites-la bouillir. Creuser ou curer un puits profond est un travail de puisatiers expérimentés, jamais d'une personne seule.

Décanter et tamiser. Laissez reposer l'eau trouble quelques heures dans une jarre couverte, puis versez la partie claire sans remuer le dépôt. Passez-la ensuite dans un tissu de coton propre plié en plusieurs épaisseurs. Dans des villages du Bangladesh, un sari plié en huit a fait reculer le choléra de près de moitié.

Monter un filtre à sable. Ces chiffres donnent le principe ; un modèle éprouvé, comme le filtre biosable du CAWST, précise la granulométrie du sable et le débit. Prenez un récipient étanche d'environ 0,9 m de haut. Mettez du gravier au fond autour de l'extrémité d'un tuyau de sortie, puis du sable plus grossier, puis au moins un demi-mètre de sable fin lavé. Faites remonter le tuyau à l'extérieur pour que son extrémité soit à environ 5 cm au-dessus de la surface du sable ; une fois l'écoulement arrêté, vérifiez qu'il reste environ 5 cm d'eau sur le sable. Une plaque percée ou une pierre plate posée dessus évite que le versement creuse le sable. Versez l'eau seau par seau et laissez le filtre reposer au moins une heure, et pas plus de deux jours, entre deux remplissages. Quand le débit

devient trop lent, remuez doucement, du plat de la main, la toute surface du sable sans la mélanger plus profond, puis retirez l'eau sale.

Un couvercle, un socle surélevé et une louche gardent mains et saletés hors de l'eau stockée.

Faire bouillir et conserver. Faites bouillir toute eau d'une source douteuse avant de la boire, même décantée et filtrée. Portez-la à gros bouillons ; les CDC conseillent de les maintenir 1 minute, ou 3 minutes au-dessus d'environ 2 000 m. Laissez refroidir à couvert, puis versez l'eau dans une jarre propre à col étroit, munie d'un couvercle. Servez-vous avec une louche propre ou en versant, jamais en plongeant un gobelet ou la main.

Un tissu plié plusieurs fois retient le limon et le plancton auquel s'accroche le vibrion du choléra.

> **Sécurité.** L'ébullition et la filtration agissent sur les germes, pas sur les produits chimiques. Nitrates venus du fumier et des latrines, arsenic, fluor, plomb, sel, carburant et pesticides restent dans l'eau, et l'ébullition concentre les nitrates en faisant évaporer l'eau. Si une source risque une pollution chimique, cherchez-en une autre. La décantation et le filtre à sable ne retiennent pas tous les germes : faites aussi bouillir l'eau. Gardez toute latrine à 30 m au moins d'un puits et en aval, le fond de la fosse à 1,5 m au moins au-dessus de la nappe à son plus haut, en saison des pluies. L'eau bouillante brûle gravement : posez la marmite bien stable et éloignez les enfants. Ne descendez pas dans un puits : l'air du fond peut manquer d'oxygène et les parois peuvent s'effondrer, et une corde ne protège ni de l'un ni de l'autre. Couvrez chaque puits pour qu'aucun enfant ni animal ne puisse y tomber.

Histoire et évolution

Les plus anciens puits datés avec certitude se trouvent à Chypre : à Kissonerga-Mylouthkia, un puits taillé dans le calcaire vers 8400 av. J.-C. atteignait l'eau à 8 m.

L'eau filtrée distribuée au public est née d'un filtre expérimental installé dans une usine écossaise de blanchiment des toiles en 1804. En 1829, James Simpson, ingénieur de la Chelsea Waterworks Company à Londres, met en service un bassin filtrant d'environ 0,4 hectare, fait de brique, de gravier et de sable, pour l'eau puisée dans la Tamise.

En 1849, John Snow soutient que le choléra voyage dans l'eau souillée par les égouts, quand la plupart des médecins accusent le « mauvais air ». Quand l'épidémie frappe Soho le 31 août 1854, il relie les morts à la pompe de Broad Street : sur 73 décès qu'il examine dans les rues voisines, 61 touchent des personnes qui buvaient son eau. La paroisse fait retirer le levier le 8 septembre, alors que l'épidémie reculait déjà. Un ecclésiastique du quartier, Henry Whitehead, remonte ensuite à l'origine probable : une fosse d'aisances devant le n° 40, où l'on avait vidé l'eau des langes d'un bébé malade. Snow compare aussi deux compagnies qui desservaient les mêmes rues : les maisons alimentées en aval des rejets d'égouts de Londres comptaient environ 315 morts du choléra pour 10 000 maisons, contre 37 pour la compagnie qui puisait en amont.

Broad Street, septembre 1854 : privée de son levier, la pompe ne pouvait plus servir.

En 1908, Jersey City devient la première ville américaine à chlorer son eau en routine ; le chlore qui reste dans l'eau continue de la protéger dans les canalisations.

Chiffres clés

Ébullition

De gros bouillons inactivent bactéries, virus et protozoaires (OMS) ; les CDC conseillent 1 minute, 3 minutes au-dessus d'environ 2 000 m

Filtre à sable domestique

En laboratoire, couche biologique mûre : 99,98 % des protozoaires et 90 à 99 % des bactéries retenus, les virus moins sûrement (CDC)

Plus ancien puits daté

Vers 8400 av. J.-C., Kissonerga-Mylouthkia (Chypre), 8 m de profondeur dans le calcaire

Latrines et puits

Au moins 30 m d'écart, fond de fosse à 1,5 m au moins au-dessus de la nappe (MSF)

Tissu plié

Un sari plié en 8 épaisseurs retient les particules de plus de 20 µm environ ; 48 % de choléra en moins dans des villages du Bangladesh (2003)

Sources

1. Boil water (technical brief WHO/FWC/WSH/15.02) · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-15.02
2. How to Make Water Safe in an Emergency · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/water-emergency/about/index.html
3. How to Create and Store an Emergency Water Supply · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/water-emergency/about/how-to-create-and-store-an-emergency-water-supply.html
4. Household Water Treatment: Slow Sand Filtration · Centers for Disease Control and Prevention https://stacks.cdc.gov/view/cdc/41390/cdc_41390_DS1.pdf
5. Biosand Filter Manual: Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance (2009) · CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) https://www.ctahr.hawaii.edu/hawaiirain/Library/Guides%26Manuals/CAWST%20files/Biosand%20Filter%20Manual_Version%2010_Sep%2009%5B1%5D.pdf
6. Technical Fact Sheet: Dug well with a hand pump (draft, 2020) · World Health Organization https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/sanitary-inspection-packages/2-tfs-dug-well-with-hand-pump-d-200506.pdf
7. Appendix 14. Excreta pit (stools and vomit) · Médecins Sans Frontières, Medical Guidelines https://medicalguidelines.msf.org/en/viewport/CHOL/english/appendix-14-excreta-pit-stools-and-vomit-32409860.html
8. Introduction to Excreta Disposal, Drainage and Hand Washing Facilities · Red Cross Red Crescent, Southeast Asia https://www.rcrc-resilience-southeastasia.org/wp-content/uploads/2018/03/5-Introduction-to-Excreta-Disposal-Drainage-and-Hand.pdf
9. Private Water Supplies Technical Manual, 6.5 Filtration · Drinking Water Quality Regulator for Scotland https://dwqr.scot/media/jl0ddz3x/pws-technical-manual-section-6-water-treatment-processes-65-filtration-larger-scale.pdf
10. Reduction of cholera in Bangladeshi villages by simple filtration (Colwell et al., 2003) · Proceedings of the National Academy of Sciences https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC298724
11. All About DWEE: Keeping Your Well Water Safe and Sound · Nebraska Department of Water, Energy, and Environment https://dwee.nebraska.gov/node/5495
12. Well · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Well
13. London's water supply and the introduction of sand filtration (Chelsea) · Institute of Water https://instituteofwater.org.uk/all/londons-water-supply-and-the-introduction-of-sand-filtration-chelsea/
14. John Snow: Cholera & the Broad Street pump · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/london-stories/john-snow-cholera-broad-street-pump/
15. Dr John Snow and Reverend Whitehead · Cholera and the Thames (Westminster City Archives) https://www.choleraandthethames.co.uk/cholera-in-london/cholera-in-soho/
16. Snow & the pump handle · Cholera in St. James, Michigan State University https://johnsnow.matrix.msu.edu/broadstpump/snow-the-pump-handle/
17. Snow's "Grand Experiment" · Adhikari, DeNero and Wagner, Computational and Inferential Thinking https://inferentialthinking.com/chapters/02/2/snow-s-grand-experiment/index.html
18. History of Drinking Water Treatment · Centers for Disease Control and Prevention https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/healthywater/drinking/history.html
19. Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter (Elliott et al., 2008) · Water Research https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.016
20. Investigation of E. coli and virus reductions using replicate, bench-scale biosand filter columns and two filter media (Elliott et al., 2015) · International Journal of Environmental Research and Public Health https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4586611
21. Slow Sand Filtration (Huisman and Wood, 1974) · World Health Organization https://www.susana.org/knowledge-hub/resources?id=4263
22. Giardiasis (DPDx, laboratory identification of parasites) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/dpdx/giardiasis/index.html

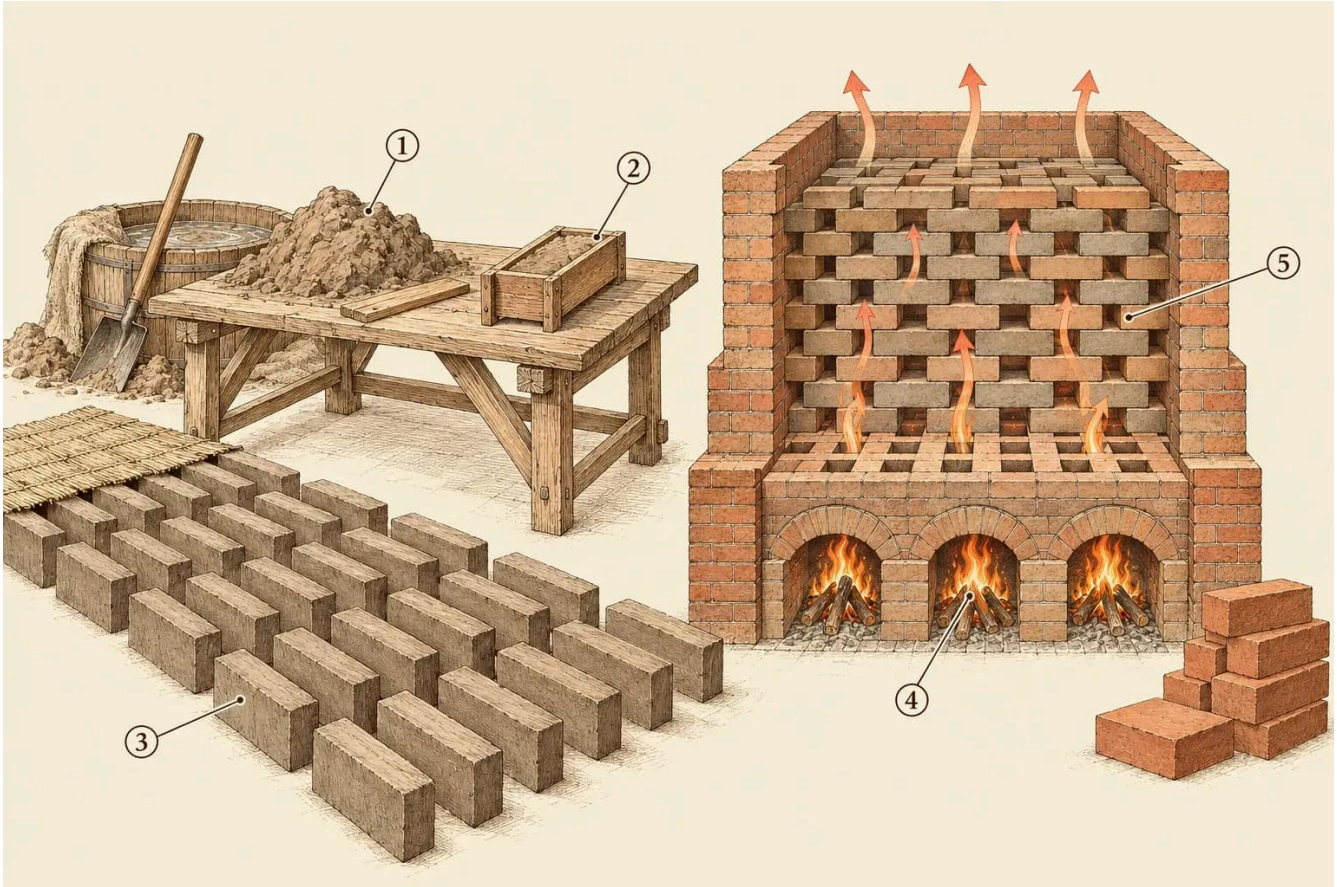
Faits vérifiés le 2026-10-13

Briques

Des blocs de terre standardisés

v. 7 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Mène à : Aqueduc (p. 147), Arc et voûte (p. 74), Béton romain (p. 167)



1 Argile préparée 2 Moule en bois 3 Briques crues en train de sécher 4 Alandier (tunnel de chauffe) 5 Briques enfournées

Une brique est un bloc d'argile façonné à une taille fixe, séché au soleil ou cuit au four, pour bâtir des murs avec des éléments identiques et faciles à manier. Les briques de terre moulées existent au Proche-Orient avant 7500 av. J.-C. ; la brique cuite n'arrive que des millénaires plus tard, et portera ensuite des villes, des aqueducs et des cheminées d'usine.

Ce que c'est

Une brique est un petit bloc de terre fabriqué selon une forme et une taille régulières. La brique crue est seulement séchée au soleil ; la brique cuite passe au four jusqu'à ce que l'argile devienne une céramique dure. Toutes deux se posent par assises, liées au mortier, et comme elles ont toutes la même taille, le bâtisseur calcule d'avance les quantités et garde des assises de niveau.

La planche montre le travail d'une briqueterie artisanale d'avant les machines : l'argile préparée près de la table de moulage, les briques crues qui sèchent en rangs, et un petit four à tirage vertical vu en coupe.

Comment ça marche

L'argile est faite de minuscules grains minéraux plats. Humides, ils glissent les uns sur les autres et la masse se façonne ; en séchant, l'eau qui les sépare s'en va, les grains se rapprochent et le bloc durcit en se rétractant. L'argile pure se rétracte tant qu'elle se fend : les briquetiers y mêlent donc du sable, de la céramique pilée ou de la paille hachée. En Mésopotamie ancienne, on utilisait surtout de la paille ou de la bouse, et une estimation donne environ 60 kg de paille pour cent briques.

Une brique crue redevient boue si on la laisse tremper : les murs en terre crue ont besoin d'un soubassement en pierre, d'un large débord de toit et d'un entretien régulier. La cuisson, elle, transforme l'argile. Les minéraux perdent d'abord l'eau liée dans leur structure, puis, vers 900 à 1 000 °C, leurs grains commencent à se souder. La brique cuite ne ramollit plus dans l'eau, et sa couleur, rouge le plus souvent, vient du fer contenu dans l'argile.

Un moule sans fond, sablé à l'intérieur, donne à chaque brique la même taille.

Dans un four à tirage vertical comme celui de la planche, le feu brûle dans des tunnels à la base. Les gaz chauds montent à travers une sole ajourée et entre les briques crues, empilées en treillis avec des vides, puis sortent par le haut. La cuisson doit commencer lentement : l'eau encore prisonnière de l'argile se change en vapeur, et une brique chauffée trop vite peut se fendre ou éclater.

Comment les fabriquer

Pour des briques crues, il suffit d'une terre convenable, d'eau, de paille, d'un moule et de quelques semaines sèches.

Tester la terre. Creusez sous la terre végétale, pleine de racines et d'humus. Faites quelques briques d'essai : si elles se fendent en séchant, la terre est trop argileuse et demande du sable ; si leurs angles s'effritent, il faut plus d'argile.

Mélanger et dégraisser. Émiettez la terre, mouillez-la et foulez-y de la paille hachée jusqu'à obtenir une pâte ferme et sans grumeaux. Un seau de paille non tassée pour cinq de terre est un bon premier essai ; corrigez ensuite d'après les briques d'essai, car certaines bonnes terres demandent peu ou pas de paille. Laissez reposer un jour sous une bâche pour que l'eau se répartisse.

Faire le moule. Assemblez quatre planches en un cadre sans fond, par exemple de 30 × 15 × 10 cm à l'intérieur, avec des poignées aux extrémités. Mouillez-le et saupoudrez-le de sable pour que l'argile se démoule.

Mouler. Posez le moule sur un sol plat et sablé, jetez-y une motte d'argile assez fort pour remplir les angles, arasez le dessus avec un bâton mouillé et soulevez le moule bien droit. Placez la brique suivante à un doigt de distance.

Faire sécher. Protégez les briques du grand soleil et de la pluie les premiers jours, puis dressez-les sur chant pour que l'air atteigne toutes les faces. Selon le temps, comptez une à quatre semaines avant de pouvoir les empiler ; cassez une brique d'essai pour vérifier qu'il ne reste pas de cœur plus sombre et humide. Pour des briques cuites, confiez quelques petits échantillons parfaitement secs à un atelier de poterie qui les passera dans son four.

> **Sécurité.** Une brique crue fraîche pèse plusieurs kilos : soulevez-la jambes fléchies et gardez des piles basses et stables. La poussière d'argile sèche contient de la silice fine : humidifiez la terre avant de l'émietter, nettoyez à l'eau plutôt qu'au balai et portez un masque FFP2 ou FFP3 bien ajusté dès que la poussière est inévitable. Clôturez ou rebouchez toute fosse creusée, car l'eau s'y accumule. La cuisson au four implique de fortes chaleurs et des fumées : laissez-la à une personne formée et ne cuisez jamais une brique encore humide.

Histoire et évolution

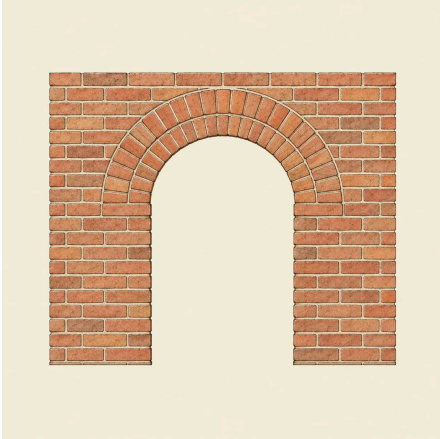
Au Proche-Orient, on bâtit déjà des murs en terre crue au IXe millénaire av. J.-C., et parmi les plus anciennes briques façonnées figurent celles de Tell Aswad, en Syrie, antérieures à 7500 av. J.-C. À Nemrik, dans le nord de l'Irak, des murs du VIIIe millénaire sont faits de longues briques en forme de cigare, d'environ 51 cm. Les briques de Jéricho, des VIIIe et VIIe millénaires av. J.-C., étaient façonnées à la main et marquées de rangées d'empreintes de pouce qui aidaient le mortier à accrocher.

Brique façonnée à la main à Jéricho : les empreintes de pouce offraient une prise au mortier.

Les briques moulées dans des cadres en bois se répandent en Mésopotamie au VIe millénaire av. J.-C. La brique cuite vient plus tard et reste d'abord réservée à des usages particuliers, car le combustible est rare : en Mésopotamie, elle apparaît à l'époque d'Uruk, au IVe millénaire av. J.-C., même si certains auteurs la font remonter plus haut, et on en fabrique en Chine à Chengtoushan vers 4400 av. J.-C. Un texte sumérien des environs de 2100 av. J.-C. décrit Gudea, souverain de Lagash, versant l'argile dans le moule et en tirant la première brique d'un nouveau temple. Les villes de la vallée de l'Indus bâtissent dès le IIIe millénaire av. J.-C. en briques cuites de taille régulière ; beaucoup approchent le rapport 1:2:4 entre épaisseur, largeur et longueur, même si les fouilleurs ont relevé plusieurs formats.

Rome produit des briques cuites normalisées en grande quantité dès le Ier siècle de notre ère, et après une longue interruption, l'Europe du Nord reprend la brique au Moyen Âge, là où la bonne pierre à bâtir manque.

La briqueterie industrielle commence au XIXe siècle avec des machines qui pressent l'argile dans des moules. En 1858, Friedrich Hoffmann fait breveter un four annulaire qui ne refroidit jamais : le feu passe d'une chambre à la suivante, tandis que les gaz chauds sèchent et réchauffent les briques qui l'attendent. Dans le four de Palmerston North, en Nouvelle-Zélande, le feu mettait environ six semaines à faire le tour de ses quatorze chambres. La brique britannique métrique normalisée mesure 215 × 102,5 × 65 mm.



Dans un arc, chaque brique est posée de chant, joint dirigé vers le centre, et la charge passe d'une brique à l'autre.

Chiffres clés

Parmi les plus anciennes briques de terre façonnées
Tell Aswad, Syrie, avant 7500 av. J.-C.

Brique britannique métrique normalisée
215 × 102,5 × 65 mm

Température de cuisson
Environ 900 à 1 000 °C pour une brique ordinaire

Four continu
Breveté par Friedrich Hoffmann en 1858

Sources

1. The Appearance of Bricks in Ancient Mesopotamia (Hnaihen, Athens Journal of History 6/1, 2020) · Athens Institute for Education and Research https://www.athensjournals.gr/history/2020-6-1-4-Hnaihen.pdf
2. Thumb-pressed brick, Tell al-Sultan (Jericho) · Queen's University Library, Museum of Near Eastern Archaeology https://virtual-exhibits.library.queensu.ca/museum-of-near-eastern-archaeology/thumb-pressed-brick/
3. Hoffman Oblong Continuous Kiln, Palmerston North · Heritage New Zealand Pouhere Taonga https://www.heritage.org.nz/list-details/194/Listing
4. Brick · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Brick
5. Technical Note 9: Manufacturing of Brick · Brick Industry Association https://www.gobrick.com/media/file/9-manufacturing-of-brick.pdf
6. ABCs of Making Adobe Bricks (Guide G-521) · New Mexico State University, Cooperative Extension Service https://pubs.nmsu.edu/_g/G521/
7. Shrinkage rates · Valentine Clays https://valentineclays.co.uk/pages/shrinkage-rates
8. Drying shrinkage · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/drying+shrinkage
9. Hands-on archaeology: how to make adobe bricks · Archaeology Southwest https://www.archaeologysouthwest.org/2018/11/04/hands-on-archaeology-how-to-make-adobe-bricks/
10. Stamford bricks: the hand-made process (Talking about technology) · Bournemouth University https://histru.bournemouth.ac.uk/Oral_History/Talking_About_Technology/building%20conservation%20technology/stamford_bricks_hand_made_process.htm
11. Material behaviour of unstabilised earth block masonry and its components under compression at varying relative humidity (Wiehle and Brinkmann, Case Studies in Construction Materials 17, 2022) · Elsevier https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01663

Faits vérifiés le 2026-10-12

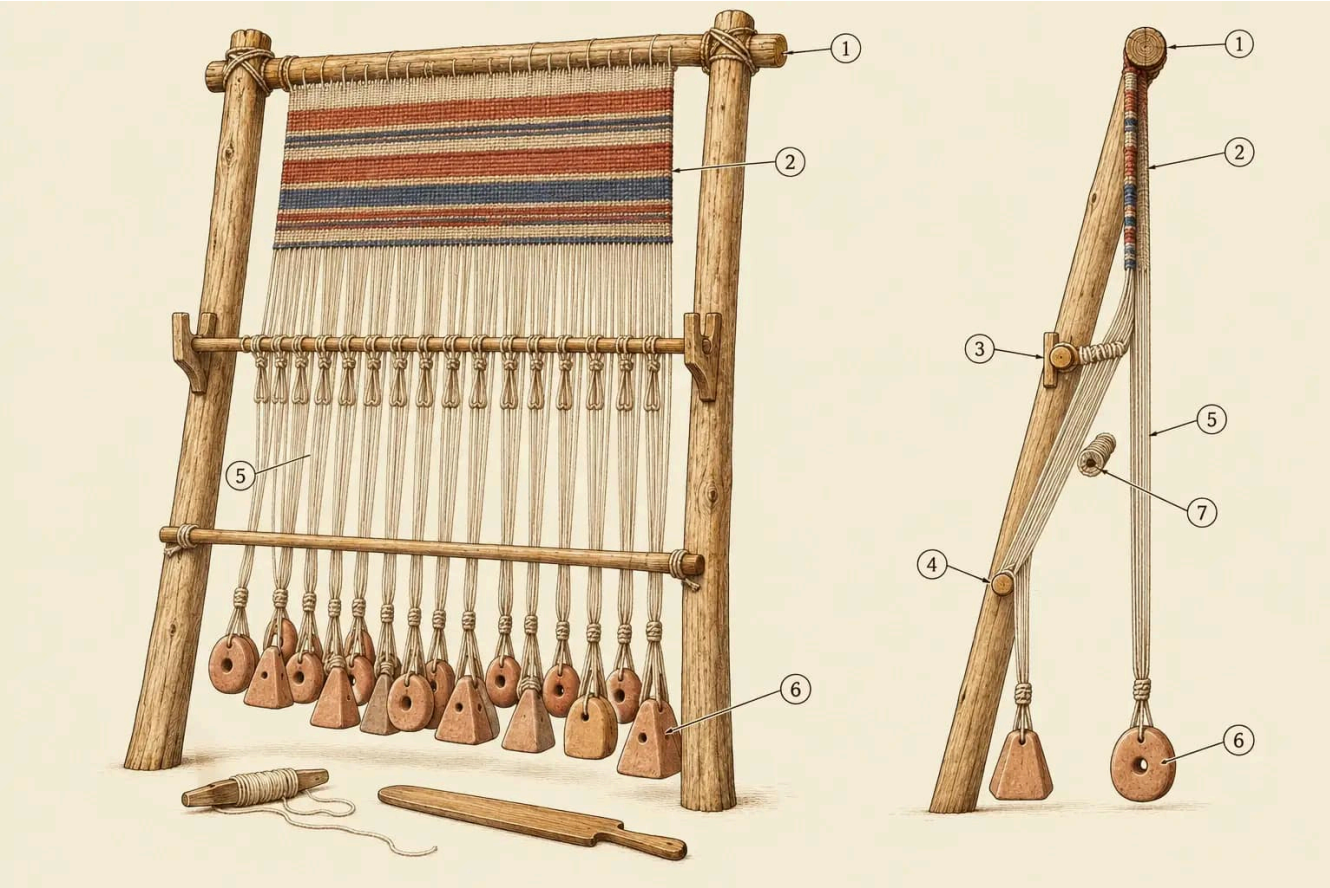
Tissage

Des fils croisés qui font l'étoffe

v. 6 700 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Corde & cordage (p. 13)

Mène à : Montgolfière (p. 233), Voile (p. 91), Machine à coudre (p. 272)



1 Ensouple supérieure 2 Étoffe tissée 3 Baguette de lices 4 Baguette d'encroix 5 Fils de chaîne 6 Poids de métier 7 Trame dans la foule ouverte

Le tissage fabrique une étoffe en faisant passer un fil, la trame, dessus puis dessous une nappe de fils tendus, la chaîne, rang après rang. Le métier tient la chaîne tendue et l'ouvre pour que la trame la traverse d'un seul geste ; le métier à poids dessiné ici remonte au Néolithique et a duré en Europe du Nord jusqu'au Moyen Âge ; il survit en quelques endroits.

Ce que c’est

Le tissage fabrique une étoffe avec deux séries de fils croisés à angle droit. La chaîne est tendue dans la longueur sur un bâti, le métier. La trame la traverse. Dans l’armure la plus simple, la toile, elle passe sur un fil, sous le suivant, et chaque rang fait l’inverse du précédent. Le frottement suffit à tenir les croisements : l’étoffe n’a besoin ni de colle ni de nœuds, et elle reste souple.

On tordait des cordes et on tressait des nattes bien avant de tisser. Le métier tient des centaines de fils à tension égale et en soulève toute une série d’un coup, si bien que la trame traverse toute la largeur en un seul geste au lieu

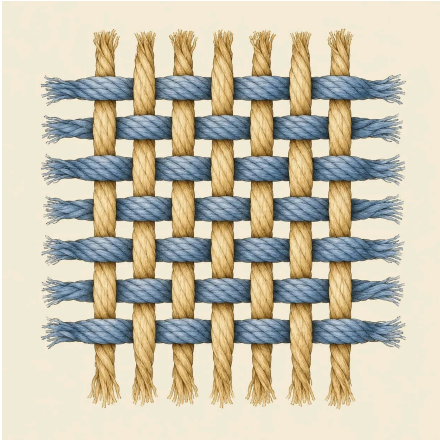
d'être passée à la main dessus et dessous chaque fil.

La planche montre un métier à poids, utilisé au Proche-Orient et en Europe dès le Néolithique, et en Europe du Nord jusqu'au Moyen Âge : deux montants s'appuient contre un mur, la chaîne pend d'une barre posée à leur sommet et des poids d'argile la tiennent tendue.

Comment ça marche

La trame passe dans une ouverture de la chaîne, la foule, que deux baguettes créent sur ce métier. La baguette d'encroix (4) est fixée en bas, en travers des montants : un fil de chaîne sur deux passe devant, les autres derrière. Comme les montants sont inclinés, les fils de devant s'écartent par-dessus la baguette alors que ceux de derrière tombent d'aplomb, et un espace s'ouvre tout seul entre les deux nappes. C'est la foule naturelle.

La baguette de lices (3) se trouve plus haut, devant la chaîne. Une boucle de ficelle, la lice, la relie à chaque fil de derrière. Quand le tisserand tire la baguette vers lui et la pose dans des supports fourchus fixés aux montants, les fils de derrière passent devant les autres et une seconde ouverture se forme, la contre-foule. La trame (7) passée dans la foule puis dans la contre-foule donne l'armure toile. D'autres baguettes, reliées à d'autres groupes de fils, permettent le sergé et les motifs.



Armure toile : à chaque rang, la trame inverse son passage dessus et dessous les fils de chaîne.

On tisse de haut en bas. Le tisserand pose chaque duite en arc lâche, pour ne pas resserrer les lisières, puis la tasse vers le haut contre l'étoffe, avec les doigts, un peigne ou une lame de bois plate, l'épée. L'étoffe finie (2) peut s'enrouler sur l'ensouple supérieure (1) : le métier produit ainsi une pièce plus longue que sa propre hauteur.

Chaque poids (6) porte un faisceau de fils de chaîne (5). Dans les essais du Centre for Textile Research de Copenhague, un fil de laine filé avec une fusaïole de 4 g demandait environ 13 g de tension, et un fil plus épais, filé avec une fusaïole de 8 g, environ 19 g. Les poids doivent pendre côte à côte, au même niveau, sinon ils s'emmêlent et usent les fils.

Comment s'y prendre

L'essentiel du travail va au fil : à six fils de chaîne et dix duites par centimètre, un mètre carré d'étoffe en demande au moins 1,6 km, plus les pertes et la longueur que prennent les fils en ondulant dessus et dessous.

Filer. Un fuseau est une baguette d'environ 25 cm munie près d'un bout d'un disque lesté, la fusaïole. Lancez-le en rotation, laissez la torsion remonter dans les fibres étirées d'une poignée de laine ou de lin, et enroulez le fil quand le fuseau approche du sol. Le fil de chaîne doit être solide, car il porte les poids.

Monter le bâti. Il faut deux montants droits d'environ 2 m, une ensouple ronde posée dans des encoches à leur sommet, une baguette d'encroix, une baguette de lices et deux supports fourchus. Percez quelques trous autour d'un bout de l'ensouple : une cheville passée dans l'un d'eux et liée à un montant l'empêche de tourner, et se retire quand on enroule l'étoffe. Appuyez les montants contre un mur solide, légèrement inclinés, calez leurs pieds et attachez leur sommet au mur ou à une poutre, pour que le métier ne bascule pas vers vous quand vous tirez la baguette de lices. Ligaturez solidement la baguette d'encroix et les supports aux montants.

Faire les poids. Modelez des anneaux ou des pyramides d'argile percés, laissez-les sécher à cœur, jusqu'à ce qu'ils ne soient plus froids au toucher, et faites-les cuire au four ou en meule par quelqu'un qui sait le faire ; des pierres

percées naturellement évitent la cuisson. Gardez-les aussi égaux que possible ; quelques centaines de grammes chacun, c'est l'ordinaire. Le fil fixe le nombre de fils par poids : à 15 g par fil environ, un poids de 300 g en porte une vingtaine. Chaque rangée de poids doit avoir à peu près la largeur de la chaîne.

Ourdir. Sur un petit métier à ruban ou aux cartes, tissez un galon étroit aussi long que l'étoffe sera large, en sortant la trame d'un côté en boucles aussi longues que la chaîne voulue : ces boucles deviendront la chaîne. Cousez le galon à l'ensouple et laissez tomber les fils. Passez un fil sur deux derrière la baguette d'encroix. Attachez les fils de devant et ceux de derrière à des poids distincts, par faisceaux égaux, et suspendez les poids de chaque rangée côte à côte, à la même hauteur. Nouez ensuite une lice entre la baguette de lices et chaque fil de derrière. Pour une pièce plus longue que le métier, enroulez la chaîne en réserve en petit écheveau au-dessus de chaque poids et déroulez-en un peu chaque fois que vous enroulez l'étoffe.

Tisser. Passez la trame dans la foule naturelle, juste sous le bord de l'étoffe, et tassez-la. Amenez la baguette de lices dans ses supports, repassez la trame, tassez de nouveau puis remettez la baguette en place. Pour finir, tissez un galon de fermeture ou nouez les bouts de chaîne en franges.

> **Sécurité.** Chargé, le métier est lourd du haut : attachez-le à un mur sain, calez ses pieds et éloignez les enfants. Un poids qui tombe peut casser un orteil, portez des chaussures fermées. L'argile humide peut éclater au feu : ne cuisez que des poids bien secs, en plein air ou dans un four ventilé, et tenez-vous à bonne distance.

Histoire et évolutions

Les étoffes se conservent mal, leurs outils beaucoup mieux : poids de métier et fusaïoles abondent sur les sites anciens.

Le tissage est peut-être plus ancien que l'agriculture. À Pavlov et à Dolní Věstonice, en Moravie, des boulettes d'argile cuite vieilles de plus de 26 000 ans portent quelque quatre-vingts empreintes qu'Olga Soffer et James Adovasio interprètent comme des cordelettes, des tissus à trame torsadée et des armures toile en fibres végétales. Ce sont des empreintes, pas des étoffes, et on ignore si un métier a servi à les faire.

La plus ancienne étoffe tissée conservée au Proche-Orient et en Europe vient de Çatalhöyük, en Anatolie, vers 6700-6500 av. J.-C. C'est une toile, préservée parce qu'elle a été carbonisée. On l'a longtemps crue en lin ; en 2021, le microscope a montré que plusieurs échantillons étaient du liber de chêne, l'écorce interne de l'arbre, d'autres étant trop carbonisés pour conclure. C'est cette étoffe qui fixe la date du tissage dans ce catalogue : les empreintes de Moravie sont plus anciennes, mais incertaines.

Les poids d'argile, qui survivent au bois du métier, montrent le métier à poids gagner l'Europe néolithique. Dans les Amériques, on tissait sur le métier à sangle, tendu entre un arbre ou un poteau et une ceinture passée autour de la taille. Le métier vertical à deux ensouples, figuré dans des tombes égyptiennes, est probablement arrivé en Europe depuis l'Égypte.

À partir du XIe ou du XIIe siècle environ, le métier horizontal à pédales, qui ouvre la foule avec les pieds, remplace peu à peu le métier à poids en Europe, plus tard dans les pays nordiques. L'ancien métier reste en usage à Fitjar, dans l'ouest de la Norvège, et à Manndalen, dans le nord, où des tisserandes sames l'ont relancé après 1945 pour de lourdes couvertures de laine.

Sur un métier à sangle, le tisserand se penche en arrière pour tendre la chaîne et en avant pour la relâcher.

Chiffres clés

Plus anciennes empreintes textiles
Pavlov et Dolní Věstonice (Moravie), il y a plus de 26 000 ans

Plus ancienne étoffe tissée conservée
Çatalhöyük (Anatolie), vers 6700-6500 av. J.-C., en armure toile

Tension de la chaîne
Environ 13 à 19 g par fil de laine dans les essais du Centre for Textile Research de Copenhague

Poids de métier
De 245 à 870 g dans un lot de sept trouvé à Voss, en Norvège

Encore en usage
Métiers à poids à Fitjar et à Manndalen, en Norvège

Sources

1. Experimental Archaeology, Part 3: Loom weights (technical report, 2007) · Centre for Textile Research, University of Copenhagen https://ctr.hum.ku.dk/research-programmes-and-projects/previous-programmes-and-projects/tools/technical_report_3__experimental_archaeology.pdf
2. Oppstadvev · Store norske leksikon https://snl.no/oppstadvev
3. Çatalhöyük – The oldest textiles at the TRC · Textile Research Centre, Leiden https://www.trc-leiden.nl/trc/index.php/en/blog/1794-catalhoeyuek-the-oldest-textile-at-the-trc
4. Upper Palaeolithic fibre technology: interlaced woven finds from Pavlov I, Czech Republic, c. 26,000 years ago · Antiquity (Adovasio, Soffer and Klíma, 1996) https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/upper-palaeolithic-fibre-technology-interlaced-woven-finds-from-pavlov-i-czech-republic-c-26000-years-ago/CD78BC4A39E2DD6958ACA29BA1BA30DA
5. Ice Age clothing said to be more advanced than previously thought · ScienceDaily / University of Illinois https://www.sciencedaily.com/releases/2000/02/000203074853.htm
6. Backstrap looms · Sam Noble Museum, University of Oklahoma https://samnoblemuseum.ou.edu/collections-and-research/ethnology/mayan-textiles/weaving-technology/backstrap-looms
7. Understanding the Archaeological Record: Reconstructing a Warp-Weighted Loom · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10351

Faits vérifiés le 2026-10-13

Salaison

Retirer l'eau pour arrêter la pourriture

v. 6 050 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Céramique (p. 23)

1 Gros sel marin 2 Jambons crus enfouis dans le sel sec 3 Harengs rangés dans le sel et la saumure 4 Jambons séchés suspendus 5 Morue salée séchant sur une claie

La salaison conserve la viande, le poisson et les légumes en retirant l'eau des aliments et celle des microbes qui les gâteraient. On faisait déjà bouillir de la saumure pour en tirer du sel en Europe de l'Est au VIe millénaire av. J.-C., et le porc salé, le hareng et la morue ont nourri armées, marins et villes jusqu'à la réfrigération.

Ce que c'est

La salaison est l'une des plus anciennes façons de conserver les aliments. On frotte la viande ou le poisson de sel sec, ou on les plonge dans une saumure, jusqu'à ce qu'il leur reste si peu d'eau libre que les bactéries d'altération ne peuvent plus s'y développer. Souvent, l'aliment est ensuite séché, fumé ou mis à mûrir. Les légumes peuvent au contraire être salés légèrement, pour que des bactéries lactiques utiles les fassent fermenter et les aigrissent, comme dans la choucroute.

La planche réunit les méthodes d'un garde-manger européen d'avant le froid : gros sel, jambons crus enfouis dans un saloir, harengs rangés dans un tonneau, jambons qui sèchent et morues fendues qui sèchent sur une claie.

Comment ça marche

Tout microbe a besoin d'eau disponible. Les spécialistes la mesurent par l'activité de l'eau, qui vaut 1,0 pour l'eau pure et baisse quand le sel ou le sucre retiennent l'eau. Le seuil varie d'un microbe à l'autre, et certaines bactéries d'intoxication alimentaire poussent encore à des valeurs assez basses, mais la grande majorité des microbes cessent de se multiplier en dessous de 0,90 environ. Une saumure saturée tourne autour de 0,75.

Au contact du sel, l'eau de la viande ou du poisson sort vers la solution salée plus concentrée, tandis que le sel pénètre lentement. Les bactéries de surface perdent leur eau de la même façon : leur contenu se rétracte loin de leur paroi, et elles cessent de croître ou meurent. Plus le sel pénètre et plus l'eau s'en va, plus l'aliment se garde. Une morue ou un jambon très salés tiennent des mois, voire des années, mais il faut les dessaler dans l'eau douce, au réfrigérateur, avant de les cuisiner.

Le sel gemme cristallise en cubes ; un cristal qui pousse plus vite par ses arêtes que par ses faces devient une « trémie » en gradins.

Le sel ne stérilise pas. Certaines bactéries dangereuses le supportent bien, comme le staphylocoque doré, et Clostridium botulinum, qui se développe à l'abri de l'air, survit sous forme de spores dans une viande ou un poisson mal salés. La plupart des sels de salaison modernes pour la viande contiennent donc du nitrite, qui freine le botulisme et garde la viande rose. Les recettes anciennes employaient le salpêtre, que les bactéries de la saumure transforment en nitrite.

La salaison légère fonctionne autrement. Avec environ 2 à 2,5 % de sel, le chou garde assez d'eau pour les bactéries lactiques, qui supportent le sel mieux que la plupart des germes d'altération. Elles changent ses sucres en acide lactique, et c'est l'acidité qui conserve.

Comment la pratiquer

Saler de la viande chez soi sans risque demande une recette éprouvée, du sel nitrité pesé et une pièce fraîche et maîtrisée. Le plus sûr pour commencer, c'est le sel et le chou : la choucroute.

Préparer le chou. Prenez des pommes fermes et fraîches, retirez les feuilles extérieures et le trognon, et émincez finement, en lanières d'environ 5 mm. Pesez.

Saler. Pour 2,25 kg de chou, mélangez 3 cuillerées à soupe de sel de conserve (sans iode ni antiagglomérant), soit environ 2 à 2,5 % du poids. Tassez fortement dans un pot en grès ou un grand bocal propre, poignée par poignée, jusqu'à ce que le sel fasse sortir le jus.

Couvrir et lester. Le chou doit rester en permanence sous sa propre saumure. Si le jus ne le couvre pas, ajoutez aussitôt une saumure de 1½ cuillerée à soupe de sel pour 950 ml d'eau bouillie refroidie. Posez dessus une assiette lestée, par exemple d'un sac fermé rempli de saumure, et couvrez d'un torchon.

Laisser fermenter. Entre 21 et 24 °C, comptez trois à quatre semaines ; entre 15 et 18 °C, cinq à six semaines. En dessous de 15 °C, la fermentation peut ne pas démarrer ; au-dessus de 24 °C, le chou risque de ramollir. Un mince voile blanc peut se former en surface : retirez-le. La choucroute est prête quand le temps prévu est écoulé, que les bulles ont cessé et que le chou est franchement acide d'un bout à l'autre. Elle se garde ensuite des mois au réfrigérateur.

> **Sécurité.** Gardez toujours les légumes sous la saumure et travaillez avec du matériel propre. Jetez tout le lot si une moisissure duveteuse ou colorée apparaît où que ce soit, ou si la choucroute devient visqueuse, rose ou sombre, ou sent la pourriture. N'improvisez pas de salaison de viande ou de poisson : le botulisme est rare mais mortel, et le sel nitrité est toxique à forte dose. N'utilisez que le produit, la dose et la précision de pesée indiqués par une recette éprouvée, étiquetez-le et tenez-le hors de portée des enfants. Les salaisons contiennent beaucoup de sel : les personnes à qui l'on a conseillé d'en limiter la consommation doivent bien les dessaler ou s'en abstenir.

Histoire et évolution

Le briquetage : on faisait bouillir la saumure dans des augets d'argile grossière au-dessus du feu, puis on les brisait pour libérer les pains de sel.

On fabriquait du sel bien avant l'écriture. À Poiana Slatinei, près de Lunca, dans le nord-est de la Roumanie, une source salée environ six fois plus concentrée que l'eau de mer est entourée d'un tertre de cendres et de terre brûlée d'environ trois mètres de haut, laissé par des gens qui faisaient bouillir la saumure au feu dès 6050 av. J.-C. environ. Les fouilleurs ignorent si ce sel servait à conserver les aliments, aux bêtes ou aux échanges : cette date marque donc la plus ancienne production de sel connue, et non le premier aliment salé.

Plus tard dans la préhistoire européenne, on faisait bouillir la saumure dans des récipients d'argile grossière posés sur des supports d'argile au-dessus du feu : c'est le briquetage. On brisait les récipients pour libérer les pains de sel, et des amas de leurs débris marquent encore les sites. À Hallstatt, en Autriche, on exploitait le sel gemme sous terre dès l'âge du bronze, et aux XIIIe et XIIe siècles av. J.-C. on y salait le porc à grande échelle dans des cuves en bois enterrées, dont huit sont aujourd'hui connues.

Les Grecs salaient le poisson, le tarichos, et les Romains appelaient salsamentum la viande et le poisson salés ; au IIe siècle av. J.-C., la Gaule envoyait à Rome de grandes quantités de porc salé. Dans l'Europe catholique, le poisson salé, et surtout la morue séchée, devint la nourriture ordinaire du vendredi et du carême, quand la viande était interdite.

La morue de Terre-Neuve était déjà salée pour les marchés européens au XVIe siècle, et au XVIIe, le sel bon marché d'Europe du Sud rendit la salaison rentable pour les nations de pêcheurs du Nord ; la morue salée devint l'un des côtés du commerce triangulaire atlantique. La conserve, à partir du début du XIXe siècle, puis la réfrigération au XXe ont pris le relais, mais le jambon, le lard et le poisson salé se conservent toujours au sel, et la choucroute fermente toujours dans sa propre saumure.

La morue salée, étêtée, fendue et séchée, se garde des années et doit tremper au réfrigérateur un jour ou plus avant d'être cuisinée.

Chiffres clés

Plus ancienne production de sel connue

Poiana Slatinei, Lunca (Roumanie), vers 6050 à 5500 av. J.-C.

Activité de l'eau d'une saumure saturée

Environ 0,75 (eau pure : 1,0)

Seuil où la plupart des microbes cessent de se multiplier

Activité de l'eau inférieure à 0,90 environ

Salaison de l'âge du bronze à Hallstatt

Cuves en bois des XIIIe et XIIe siècles av. J.-C., surtout pour le porc

Sources

1. The earliest salt production in the world: an early Neolithic exploitation in Poiana Slatinei-Lunca, Romania (Weller and Dumitroaia, 2005) · Antiquity https://www.antiquity.ac.uk/projgall/weller306/
2. Bronze Age meat curing vats · Naturhistorisches Museum Wien https://www.nhm.at/hallstatt/en/trading_hub/meat_processing_industry/meat_curing_vats
3. Is there a common water-activity limit for the three domains of life? (Stevenson et al., ISME Journal, 2015) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4438321/
4. Sauerkraut · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/ferment/recipes/sauerkraut/
5. Curing (food preservation) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Curing_(food_preservation)
6. Dried and salted cod · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Dried_and_salted_cod
7. One-directional modelling to assess the mechanistic actions of power ultrasound on NaCl diffusion in pork (McDonnell et al., Ultrasonics Sonochemistry 40, 2018) · Elsevier https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.06.025
8. The physics behind ham production (Parnovsky and Varlamov, 2026) · arXiv https://arxiv.org/abs/2607.18173
9. Interactive comment on Rose et al.: water activity of aqueous NaCl after Archer's evaluation (Clegg, 2007) · Atmospheric Chemistry and Physics Discussions https://acp.copernicus.org/preprints/7/S4180/2007/acpd-7-S4180-2007.pdf
10. Water Activity of Foods (MF3674) · K-State Research and Extension https://bookstore.ksre.ksu.edu/download/water-activity-of-foods_MF3674
11. Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls for Human Food, Appendix 3: Bacterial Pathogen Growth and Inactivation (Table 3-A) · US Food and Drug Administration https://www.fda.gov/media/99598/download

Faits vérifiés le 2026-10-12

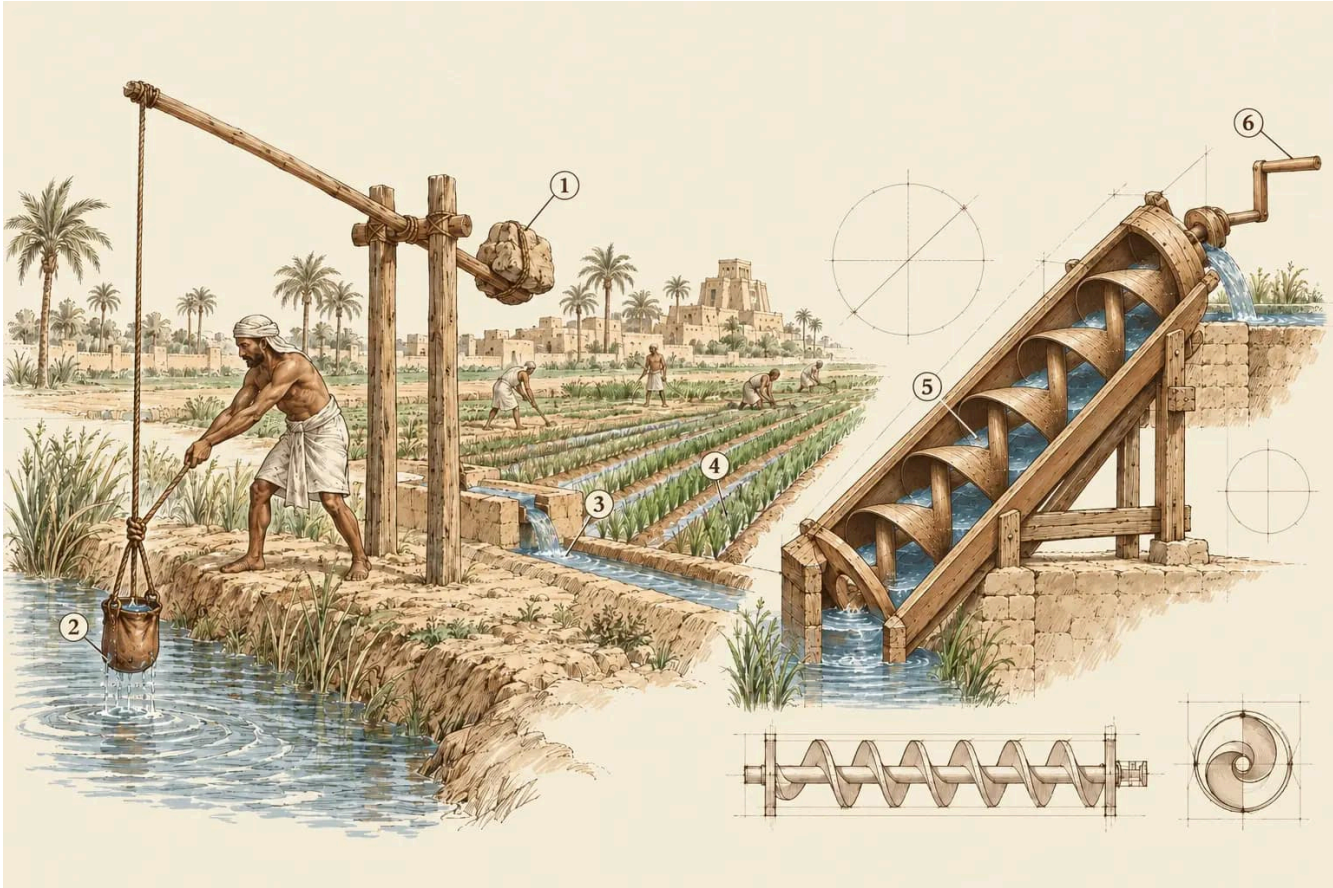
Irrigation

Conduire l'eau jusqu'aux cultures

v. 6 000 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5), Corde & cordage (p. 13)

Mène à : Aqueduc (p. 147)



1 Contrepoids du chadouf 2 Seau de cuir 3 Canal d'amenée 4 Sillons entre les rangs 5 Hélice de la vis 6 Manivelle

L'irrigation apporte aux cultures l'eau que la pluie ne suffit pas à leur donner, soit en la laissant couler dans des canaux à pente douce, soit en la remontant d'une rivière ou d'un puits. Les plus anciens canaux connus ont été creusés il y a environ huit mille ans dans les plaines sèches de Mésopotamie, qui ont aussi montré très tôt qu'un champ arrosé sans drainage peut se charger de sel.

Ce que c'est

Irriguer, c'est donner de l'eau aux cultures au moment où elles en ont besoin, sans attendre la pluie. Dans le sud de l'Irak ou dans la vallée égyptienne du Nil, aucune agriculture n'est possible sans elle ; ailleurs, elle augmente les rendements et permet une seconde récolte pendant la saison sèche.

Si la source est plus haute que le champ, la pente fait le travail : un canal quitte la rivière en amont et descend doucement jusqu'aux terres. Si l'eau est plus bas, entre des berges hautes ou au fond d'un puits, il faut la remonter. La planche montre un chadouf qui alimente un canal et ses sillons, puis une vis d'Archimède.

Comment ça marche

Dans un lit trop plat, l'eau ralentit, dépose son limon et laisse pousser les roseaux ; dans un lit trop raide, elle creuse le fond et rompt les berges. Un petit canal en terre ne perd souvent guère plus d'un mètre par kilomètre, et la FAO recommande pour les sillons une pente comprise entre 0,05 et 0,5 %. Les canaux suivent donc les courbes de niveau et descendent progressivement.

Au champ, l'eau inonde un bassin plat fermé par de petites levées de terre, où elle s'infiltre, ou bien elle court dans des sillons entre les rangs et gagne les billons par le côté.

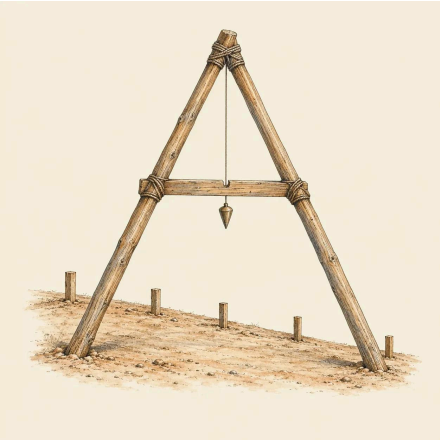
Monter un mètre cube d'eau d'un mètre demande au moins 9,8 kilojoules, et les frottements s'y ajoutent ; une machine rend seulement ce travail plus facile à fournir. Le chadouf est un levier avec un seau au bout long et une pierre ou une motte de terre séchée au bout court. Le paysan tire le seau vide vers l'eau, ce qui soulève le poids, et le poids remonte le seau plein. Lors de mesures faites au Tchad, une personne élevait de 39 à 130 litres par minute sur des hauteurs de 1,8 à 6,2 m. Pour le même effort, plus la hauteur est grande, moins on monte d'eau.

Le chadouf : dès que le paysan lâche la perche, le contrepoids remonte le seau plein.

La vis d'Archimède est une hélice qui tourne dans un tube incliné d'environ 30°. L'eau reste au point bas de chaque spire, et ce point bas remonte à mesure que la vis tourne, emportant une poche d'eau. Elle déplace de gros volumes sur quelques mètres de hauteur ; plus elle est raide, plus chaque poche est petite.

Toute eau d'irrigation contient un peu de sel dissous. Les plantes et le soleil prennent l'eau et laissent le sel. Les fuites des canaux et des champs font aussi monter la nappe, et l'eau salée remonte alors jusqu'aux racines. Un champ ne reste sain que si l'on fait passer de temps en temps un surplus d'eau qui entraîne le sel en profondeur, et si un drainage, naturel ou creusé, l'évacue. Sinon le sel s'accumule, parfois en croûte blanche, et les récoltes baissent.

Comment le construire



Le niveau en A : quand le fil à plomb tombe sur le repère, les deux pieds sont à la même hauteur.

Fabriquer un niveau en A. Ligaturer en haut deux perches d'environ 2,80 m, pieds écartés de 4 m, et fixer une traverse à environ 1 m du sol. Pendre un fil à plomb au sommet. Poser le cadre sur deux piquets, marquer où le fil croise la traverse, retourner le cadre et marquer de nouveau : le milieu des deux marques indique le niveau.

Tracer le canal. Avancer le cadre depuis la prise d'eau en plantant un piquet à chaque pied. Pour donner une pente, glisser une cale sous le pied aval et déplacer ce pied jusqu'à ce que le fil tombe sur le repère, puis planter le piquet : une cale de 1 cm sur un cadre de 4 m donne 0,25 %. Creuser le long des piquets et damer les déblais en levée du côté aval.

Ouvrir les sillons. Les tirer du canal avec la même pente douce, à 30 à 60 cm d'écart en sol sableux et de 75 cm à 1,50 m en sol argileux, chacun alimenté par une encoche dans la berge. Laisser couler jusqu'à ce que la terre soit humide jusqu'aux racines au bout du sillon, puis refermer l'encoche, et conduire l'extrémité des sillons vers un fossé de drainage pour évacuer le surplus.

Monter un chadouf. Planter solidement deux poteaux au bord de l'eau, avec une traverse sur laquelle pivote une perche de trois à quatre mètres, au quart de sa longueur. Suspendre un seau au bout long et une pierre ou un sac de terre au bout court, en ajustant le poids jusqu'à ce qu'un seau plein monte d'une simple poussée.

Ou enrouler une petite vis. Enrouler un tuyau souple autour d'une perche, chaque spire avançant à peu près de l'épaisseur de la perche. Monter la perche à environ 30° sur deux paliers, assez bas pour que l'embouchure du tuyau plonge sous l'eau pendant une partie de chaque tour, et fixer une manivelle en haut. Tourner dans le sens où l'embouchure avale l'eau en y entrant. Si rien ne monte, essayer d'abord l'autre sens, puis baisser l'angle ou resserrer les spires.

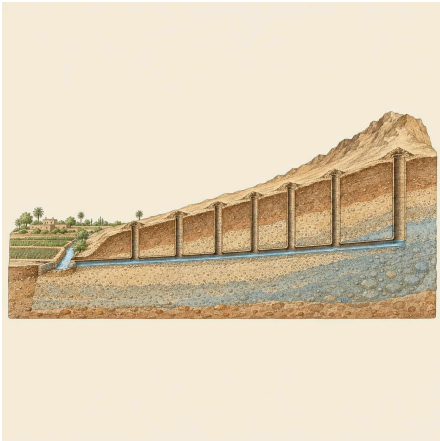
> **Sécurité.** On se noie même dans un canal étroit aux berges raides et glissantes : ne jamais travailler seul au bord de l'eau et éloigner les enfants. Garder les fossés peu profonds, pas plus que le genou, et ne jamais descendre dans une tranchée plus profonde : ses parois peuvent s'effondrer sans prévenir. Tenir les déblais à distance du bord. Se tenir hors de la course du contrepoids du chadouf. Supprimer en quelques jours toute eau stagnante, où pondent les moustiques. Là où sévit la bilharziose, ses parasites vivent dans l'eau douce, stagnante ou courante, et traversent la peau : éviter tout contact de la peau avec l'eau des canaux. L'eau d'irrigation n'est pas de l'eau potable.

Histoire et évolution

À Choga Mami, dans l'est de l'Irak près de la frontière iranienne, les fouilleurs ont trouvé des chenaux d'environ 6000 av. J.-C. qu'ils interprètent comme des fossés d'irrigation ; certains les placent plutôt vers 5500 av. J.-C. Les cités de Sumer ont ensuite vécu des canaux du Tigre et de l'Euphrate, et des textes de Lagash décrivent des réseaux complets vers 2400 av. J.-C.

En Égypte, des digues de terre découpaient la plaine inondable en bassins. Pendant la crue, des vannes laissaient entrer l'eau, qui y restait environ un mois avant d'être évacuée pour les semailles. Le chadouf, représenté sur un sceau mésopotamien d'environ 2200 av. J.-C., arrive en Égypte au IIe millénaire av. J.-C.

Des auteurs grecs attribuent à Archimède, au IIIe siècle av. J.-C., la vis employée en Égypte ; l'assyriologue Stephanie Dalley lit dans une inscription de Sennachérib, vers 700 av. J.-C., la mention de vis de bronze à Ninive, une lecture encore discutée. Les qanats, galeries qui conduisent l'eau souterraine sur des kilomètres, sont en général attribués à l'Iran du Ier millénaire av. J.-C., mais ils sont difficiles à dater ; environ 37 000 y fonctionnaient encore en 2015.



Un qanat capte l'eau souterraine sous les collines et l'amène au jour par une galerie.

En 1958, Thorkild Jacobsen et Robert Adams ont soutenu que la montée du sel avait poussé les paysans sumériens à remplacer le blé par l'orge, plus résistante ; Marvin Powell a contesté cette théorie en 1985. Le goutte-à-goutte, mis au point en Israël par l'ingénieur Simcha Blass et fabriqué par Netafim à partir de 1965, amène aujourd'hui l'eau au pied de chaque plante.

Chiffres clés

Plus ancienne irrigation par canaux connue

Choga Mami, est de l'Irak, vers 6000 av. J.-C. (certaines estimations : 5500 av. J.-C.)

Inclinaison de la vis d'Archimède

Environ 30° en général ; Vitruve utilise un triangle 3-4-5, soit environ 37°

Part des terres cultivées

Environ 18 % des terres arables du monde étaient irriguées en 2000 (FAO)

Débit d'un chadouf, un seul homme

39 à 130 litres par minute, pour des hauteurs de 1,8 à 6,2 m (mesures de terrain au Tchad)

Pente des sillons

0,05 à 0,5 %, soit 0,5 à 5 m de dénivelé par kilomètre (FAO)

Sources

1. Choga Mami · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Choga_Mami
2. Dating Ancient Canal Systems Using Radiocarbon Dating and Archaeological Evidence at Tello/Girsu (Egberts et al., 2023) · Radiocarbon 65(4), Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/radiocarbon/article/dating-ancient-canal-systems-using-radiocarbon-dating-and-archaeological-evidence-at-tellogirsu-southern-mesopotamia-iraq/DFCB7F569B744396C9E4BDA923A8EB07
3. Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide (Yannopoulos et al., 2015) · Water 7(9), MDPI https://www.pumpfundamentals.com/pumps%20historical.pdf
4. Shadoof · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Shadoof
5. The Ten Books on Architecture, Book X (water screw, ch. 6) · Vitruvius, LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
6. Archimedes' screw: optimal design · Chris Rorres, New York University https://math.nyu.edu/Archimedes/Screw/optimal/optimal.html
7. The mystery of the Hanging Garden of Babylon (Stephanie Dalley) · Oxford University Press https://blog.oup.com/2013/06/mystery-hanging-garden-babylon/
8. Ancient Egypt water engineering · University of Wisconsin–Madison, Ancient Engineering Technologies https://ancientengrtech.wisc.edu/ancient-egypt-water-engineering
9. Qanat · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Qanat
10. Irrigation Water Management: Irrigation Methods, ch. 2 Basin irrigation · FAO http://www.fao.org/4/s8684e/s8684e03.htm
11. Irrigation Water Management: Irrigation Methods, ch. 3 Furrow irrigation · FAO http://www.fao.org/4/s8684e/s8684e04.htm
12. Canals, Annexes 2 and 3: How to construct a canal; How to determine the slope of a canal alignment · FAO http://www.fao.org/4/ai585e/ai585e07.pdf
13. Simple methods for aquaculture: contour levelling methods (A-frame level) · FAO https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707e/x6707e06.htm
14. Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation, ch. 7 Salinity · FAO https://www.fao.org/4/R4082E/r4082e08.htm
15. The Challenge of Salinization · Soil Science Society of America https://soils4teachers.org/files/s4t/know-soil-challenge-of-salinization.pdf
16. Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture (Jacobsen and Adams, 1958) · Science 128, KeiBi catalogue, University of Tübingen https://keibi.uni-tuebingen.de/Record/KEI00116827
17. Salt, Seed, and Yields in Sumerian Agriculture. A Critique of the Theory of Progressive Salinization (Powell, 1985) · Zeitschrift für Assyriologie 75, KeiBi catalogue, University of Tübingen https://keibi.uni-tuebingen.de/Record/KEI00062118
18. Water factsheet · FAO https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/docs/FAOWfactsheet.pdf
19. What Israeli drips did for the world · The Times of Israel https://www.timesofisrael.com/what-israeli-drips-did-for-the-world/
20. Schistosomiasis fact sheet · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/schistosomiasis
21. The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw (Rorres, 2000) · Journal of Hydraulic Engineering 126(1), ASCE https://math.nyu.edu/Archimedes/Screw/optimal/screw.pdf
22. Water Lifting Devices (Fraenkel), 3.6.3 Archimedean screw and open screw pumps · FAO Irrigation and Drainage Paper 43 https://www.fao.org/4/ah810e/AH810E06.htm
23. Water Lifting Devices (Fraenkel), 4.2 Human power · FAO Irrigation and Drainage Paper 43 https://www.fao.org/4/ah810e/AH810E08.htm

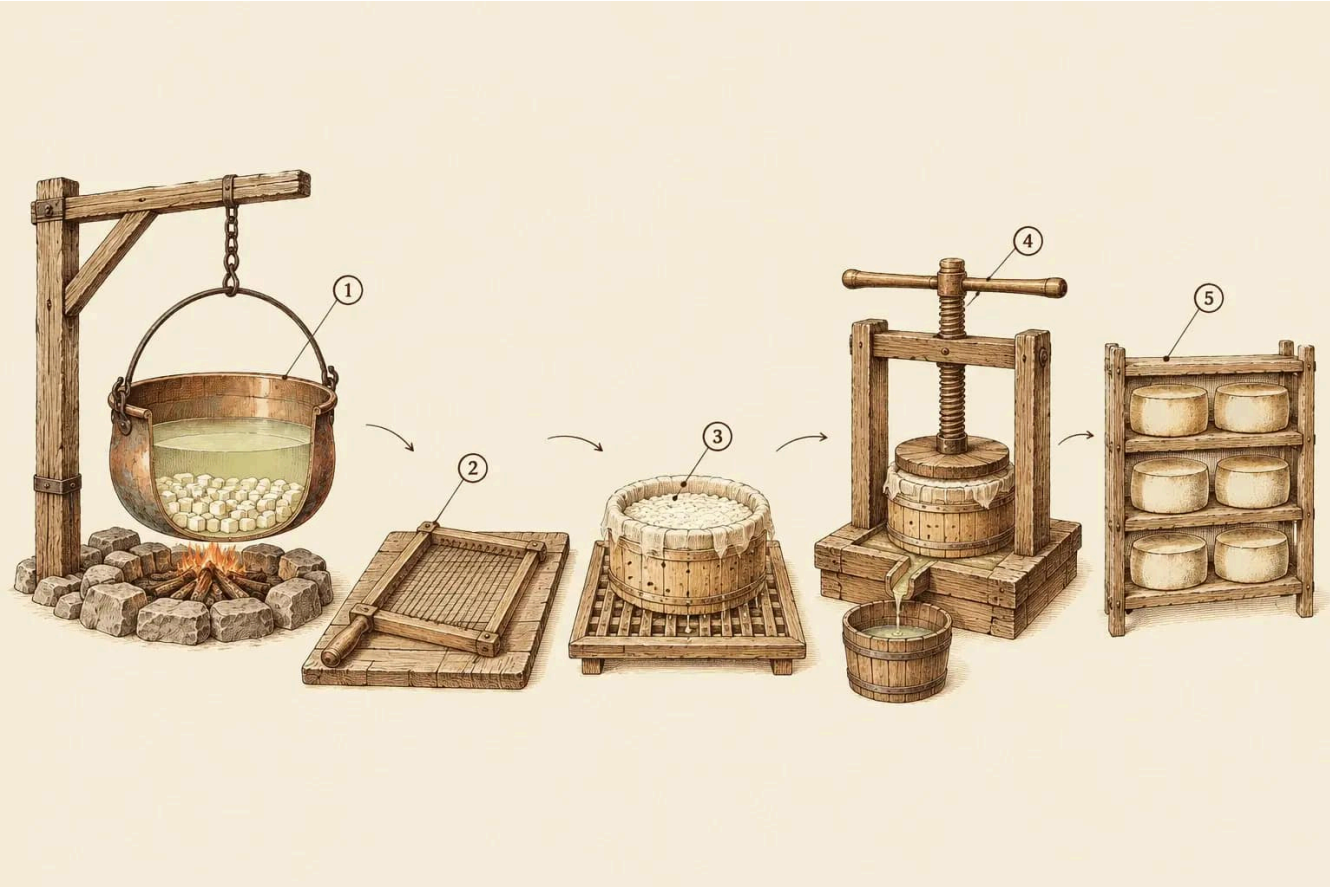
Faits vérifiés le 2026-10-14

Fromage

Le lait qui se garde des mois

v. 5 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Céramique (p. 23)



1 Chaudron de cuivre, caillé découpé dans le petit-lait 2 Tranche-caillé (harpe) 3 Moule garni d'une toile 4 Presse à vis 5 Rayons d'affinage

Le fromage est du lait dont la protéine a été caillée, égouttée de son petit-lait, puis souvent salée et affinée, si bien qu'il se garde bien plus longtemps que le lait frais. Des résidus de matière grasse laitière dans des poteries percées du Néolithique montrent qu'on en fabriquait en Europe il y a plus de 7 000 ans.

Ce que c'est

Le fromage est un aliment solide obtenu en faisant cailler la protéine du lait et en égouttant sa partie aqueuse, le petit-lait ou lactosérum. Les fromages frais se mangent en quelques jours ; les pâtes dures sont pressées, salées et affinées pendant des mois, voire des années. Dans tous les cas, la plus grande partie de l'eau s'en va, et avec elle une bonne part du lactose, le sucre du lait que beaucoup d'adultes digèrent mal.

La planche suit un fromage de ferme du XVIIIe siècle à travers ses étapes : le caillé découpé dans un chaudron de cuivre au-dessus du feu, la harpe à fils qui l'a tranché, un moule garni de toile, une presse à vis et les rayons où mûrissent les meules.

Comment ça marche

Le lait est surtout de l'eau qui contient des gouttelettes de matière grasse, du lactose et des protéines. Environ quatre cinquièmes des protéines du lait de vache sont des caséines, qui flottent en minuscules amas appelés micelles. Chaque micelle porte une couche externe chevelue formée d'une caséine particulière, la caséine kappa, qui tient les amas à distance les uns des autres.

La présure, tirée traditionnellement de la caillette d'un jeune veau, contient une enzyme, la chymosine. Elle coupe la caséine kappa en un point précis et rase cette couche chevelue. Aidées par le calcium du lait, les micelles mises à nu s'agglomèrent alors en un gel souple, le caillé, qui emprisonne la matière grasse. Les fromagers emprésurent en général le lait vers 30 à 32 °C. L'acidité peut aussi faire cailler le lait, souvent avec l'aide de la chaleur : le paneer s'obtient en ajoutant du jus de citron ou de l'acide citrique à du lait chaud.

Quand le gel est assez ferme, le fromager le découpe en cubes. Le petit-lait suinte de chaque face coupée. En brassant et en chauffant doucement, on en chasse davantage, et la taille des cubes décide de la sécheresse du fromage. Le caillé est ensuite moulé et pressé, salé en surface ou en saumure, puis mis à affiner. Pendant l'affinage, bactéries et enzymes découpent protéines et graisses en molécules plus petites qui donnent le goût et modifient la texture. Le sel tire l'eau de la surface, freine les microbes indésirables et aide à former la croûte.

Le découpage du caillé : plus les cubes sont petits, plus le petit-lait s'écoule et plus le fromage sera ferme.

Comment le faire

Le fromage le plus simple à faire chez soi est le paneer, caillé par la chaleur et l'acidité et consommé frais. Il faut 2 litres de lait de vache entier pasteurisé, environ 5 g d'acide citrique dissous dans 250 ml d'eau (ou le jus filtré de deux citrons), une marmite à fond épais, un thermomètre, une passoire, une étamine, une planchette et un poids de 2 à 3 kg.

Chauffer le lait. Portez le lait à 85 à 90 °C en remuant pour qu'il n'attache pas, puis retirez-le du feu et laissez-le redescendre vers 70 °C. Caillé beaucoup plus chaud, le fromage devient dur et sec ; beaucoup plus froid, il reste mouillé.

Faire cailler. Versez l'acide petit à petit en remuant doucement, jusqu'à ce que des grumeaux blancs se séparent et que le petit-lait devienne clair et jaune verdâtre. Il se peut que tout ne soit pas nécessaire. Laissez reposer dix minutes sans toucher.

Égoutter et presser. Garnissez la passoire d'étamine, versez-y le caillé et laissez couler le petit-lait. Rabattez la toile, posez la planchette et le poids et pressez 30 à 60 minutes, jusqu'à ce que le bloc se tienne.

Refroidir et conserver. Coupez le bloc en morceaux et plongez-les une heure ou deux dans de l'eau glacée pour les raffermir. Gardez le paneer au réfrigérateur à 4 °C au plus et mangez-le dans les trois jours. Deux litres de lait de vache en donnent environ 350 g.

Les fromages pressés à la présure qui s'affinent pendant des semaines demandent un ferment dosé, un contrôle de l'acidité à chaque étape et une cave tenue à la bonne température et à la bonne humidité. Apprenez-les avec une recette complète et éprouvée, ou lors d'un stage, avant de vous lancer.

> **Sécurité.** Utilisez du lait pasteurisé : le lait cru peut porter des listérias, des E. coli et d'autres bactéries dangereuses, et les fromages à pâte molle au lait cru sont une cause connue de listériose, un risque grave pendant la grossesse. Le lait chaud brûle et déborde facilement : éloignez les enfants de la marmite. Nettoyez chaque ustensile, mettez le fromage au froid dès qu'il est fait, et ne vous fiez ni à l'odeur ni à l'aspect pour juger de sa sûreté : jetez tout fromage gardé trop longtemps, trop au chaud, ou qui sent ou paraît anormal.

Histoire et évolution

La plupart des adultes des premières communautés agricoles ne digéraient pas le lactose, contrairement aux enfants. L'égouttage du petit-lait enlève au fromage l'essentiel de son lactose, et dans le yaourt, les bactéries en dégradent une partie. Sur la côte dalmate, en Croatie, des résidus de lait apparaissent dans des poteries il y a environ 7 700 ans, et des résidus de produits laitiers fermentés, fromage frais ou yaourt, il y a environ 7 200 ans.

Une faisselle néolithique comme celles de Cujavie, en Pologne, où l'on a retrouvé des graisses laitières : sans doute un égouttoir à fromage.

En Cujavie, au centre de la Pologne, une équipe menée par Mélanie Salque, de l'université de Bristol, a analysé 50 fragments provenant de 34 poteries percées des premiers agriculteurs d'Europe centrale, vieilles d'environ 7 000 à 7 500 ans, et y a trouvé d'abondantes graisses laitières. Aucune molécule n'est propre au fromage, mais égoutter le caillé est l'usage évident de ces passoires, et l'étude de 2012 y voit la plus ancienne preuve directe de fabrication fromagère.

Le plus ancien fromage conservé a environ 3 600 ans ; il était déposé sur des momies du cimetière de Xiaohe, au Xinjiang. L'auteur romain Columelle, vers 65 de notre ère, décrit l'emprésurage, le pressage, le salage et l'affinage à peu près comme on les pratique aujourd'hui.

Les monastères médiévaux ont conservé et perfectionné de nombreux fromages, et les mentions du roquefort dans les archives de l'abbaye de Conques remontent à 1070. Aux États-Unis, le fromage resta une production de ferme jusqu'en 1851, quand Jesse Williams, dans le comté d'Oneida, dans l'État de New York, se mit à le fabriquer avec le lait réuni des fermes voisines : ce fut la première fromagerie industrielle des États-Unis. La présure commerciale apparut dans les années 1860 et 1870, puis vinrent les cultures bactériennes pures, qui rendirent la fabrication bien plus régulière. La plupart des présures utilisées aujourd'hui sont de la chymosine produite par des micro-organismes.

Les trous ronds de certains fromages alpins sont des bulles de gaz carbonique produit par des bactéries pendant l'affinage.

Chiffres clés

Plus ancienne preuve directe
Graisses laitières dans des faisselles en terre cuite, Cujavie (Pologne), il y a environ 7 000 à 7 500 ans

Part des protéines du lait qui caillent
Les caséines, environ 80 % des protéines du lait de vache

Température habituelle d'emprésurage
Environ 30 à 32 °C

Première fromagerie industrielle des États-Unis
Jesse Williams, comté d'Oneida (New York), 1851

Sources

1. Say cheese! Central European farmers did, 7,500 years ago · NBC News https://www.nbcnews.com/id/wbna50177947
2. Evidence of 7,200-year-old cheese making found on the Dalmatian Coast · Penn State University https://www.psu.edu/news/research/story/evidence-7200-year-old-cheese-making-found-dalmatian-coast
3. Extent of κ-casein hydrolysis during renneting of bovine milk (Kayihura, Food Science & Nutrition, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10916671/
4. Technology of paneer · INFLIBNET e-PG Pathshala (Technology of Milk and Milk Products) https://ebooks.inflibnet.ac.in/ftp04/chapter/technology-of-paneer/
5. History of cheese · International Dairy Foods Association https://www.idfa.org/news-views/media-kits/cheese/history-of-cheese
6. Cheese · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Cheese

Faits vérifiés le 2026-10-12

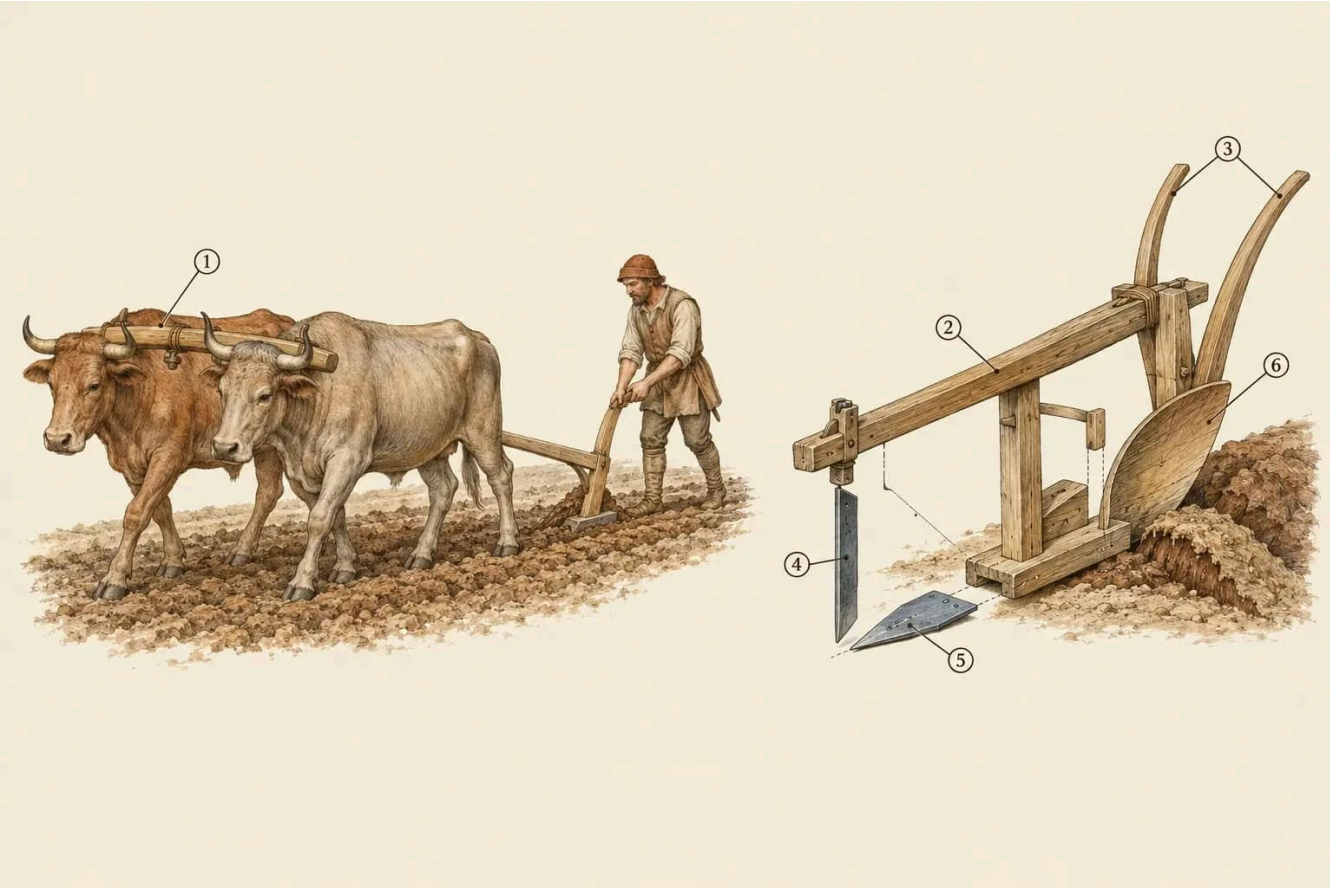
Charrue

Ouvrir la terre pour la semence

v. 5 000 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5), Corde & cordage (p. 13)

Mène à : Rotation des cultures (p. 111)



1 Joug 2 Age (flèche) 3 Mancherons 4 Coutre 5 Soc 6 Versoir

La charrue, et avant elle l'araire, est tirée dans le sol pour l'ouvrir et l'ameublir avant les semailles. L'araire se contentait de gratter un sillon ; la charrue à versoir, qui retourne la terre, a permis de cultiver les sols lourds et humides du nord de l'Europe.

Ce que c'est

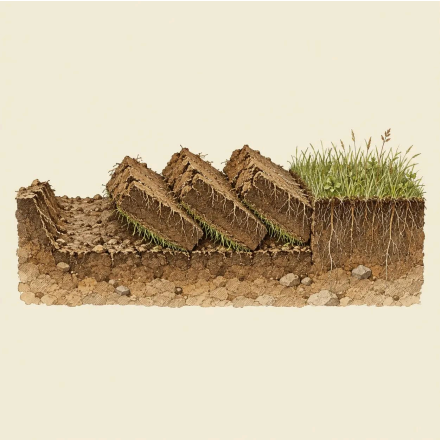
Une charrue est une lame tirée à travers la terre par des hommes, des animaux ou un moteur. Elle brise la couche superficielle du sol, enfouit les mauvaises herbes et les restes de la récolte précédente, et ameublit la terre, qu'une herse émiettera ensuite pour les semis. Avec une paire de bœufs, une famille cultivait ainsi bien plus de terre qu'à la houe.

L'araire a un soc pointu qui glisse dans le sol et ouvre un sillon peu profond sans retourner la terre. La charrue proprement dite tranche une bande de terre et la renverse. La planche montre les deux : à gauche, un attelage de bœufs tire un araire ; à droite, les pièces d'une charrue à versoir.

Un araire tout en bois.

Comment ça marche

L'araire est un coin. Le soc avance sous un angle faible, à quelques centimètres sous la surface, et soulève la terre en la repoussant des deux côtés. Il ameublit sans retourner, ce qui convient aux sols légers et secs dont il faut garder l'humidité. On labourait souvent deux fois, la seconde à angle droit de la première, d'où les champs à peu près carrés des agricultures à l'araire.



Les bandes retournées s'appuient les unes contre les autres, l'herbe dessous.

Dans une charrue à versoir, trois pièces agissent l'une après l'autre. Le coutre, un couteau vertical fixé à l'age, fend le sol en avant. Le soc, une lame plate placée en bas, tranche la bande de terre par-dessous. Le versoir, une planche incurvée derrière le soc, soulève cette bande, la tord et la couche à l'envers contre la précédente. Les herbes et le chaume se retrouvent enfouis, et la terre du dessous est exposée à l'air et au gel.

Un versoir fixe rejette toujours la terre du même côté. Le laboureur médiéval travaillait chaque longue planche autour de son axe, en renversant la terre vers le milieu à chaque passage : la planche se bombait peu à peu en billon, ce qui drainait les argiles humides.

Un araire léger se contente d'un ou deux animaux. Les lourdes charrues médiévales pouvaient demander jusqu'à huit bœufs sur l'argile. Aujourd'hui, un tracteur tire plusieurs corps côte à côte, chacun retournant une bande de 20 à 30 cm de profondeur.

Comment la construire

Un araire simple se fabrique entièrement en bois, avec une hache, un couteau et une tarière. Voici les grandes étapes, sans plan coté.

Trouver le bois. Cherchez une branche de bois dur, frêne ou chêne par exemple, qui forme un coude naturel là où une grosse branche rejoint une plus petite. Le long bras deviendra l'age ; le court, recoupé à une quarantaine de centimètres, fera le soc et le sep. Un coude naturel résiste mieux qu'un assemblage.

Façonner le soc. Taillez le bras court en pointe mousse, plat dessous. Il doit attaquer le sol à 30 degrés environ quand l'age est relevé à hauteur du joug. Le bois nu s'use vite : taillez une pointe de rechange. Une pointe de fer dure bien plus longtemps.

Poser le mancheron. Percez l'age juste au-dessus du soc et emmanchez-y une poignée verticale bien coincée, pour que le laboureur puisse diriger et appuyer.

Faire le joug. Un joug de garrot est une poutre façonnée pour reposer devant le garrot des bœufs, avec un arceau de bois ou une courroie autour de chaque cou. Attachez l'extrémité de l'age au milieu du joug avec une corde ou une cheville.

Labourer. N'employez que des bœufs déjà dressés au joug, avec un bouvier expérimenté à leur tête. Commencez par de courtes raies sur une terre fraîche, pas détrempée, en appuyant sur le mancheron pour garder le soc en terre.

> **Sécurité.** Les bœufs sont puissants et peuvent prendre peur. Ne vous placez jamais entre un animal et l'araire, attelez avec un nœud qui se défait d'un coup, et laissez l'attelage se reposer et boire. Arrêtez tout si le joug frotte : un joug mal ajusté provoque plaies et blessures. Gardez les pieds loin du soc.

Histoire et évolution

L'araire est venu une fois les bovins dressés à tirer, sans qu'on sache exactement quand. Les plus anciennes traces de labour connues, des rayures scellées sous les alluvions à Sion, en Suisse, datent de 5100 à 4700 av. J.-C. ; d'autres, plus récentes, en Italie du Nord, au Danemark et à Prague-Bubeneč, datent d'environ 4300 à 3500 av. J.-C. Aucune trace de labour n'est conservée au Proche-Orient, où l'araire est peut-être plus ancien encore. En Mésopotamie, des sceaux et des textes montrent des araires au IIIe millénaire av. J.-C., certains munis d'un entonnoir qui faisait tomber la semence dans le sillon. À Kalibangan, dans le nord-ouest de l'Inde, un champ labouré date d'environ 2800 av. J.-C.

Vers 1000 av. J.-C., les araires du Proche-Orient reçoivent un soc amovible et remplaçable, et les paysans chinois emploient des socs de fer vers 500 av. J.-C. Sous la dynastie Han, aux Ier et IIe siècles de notre ère, des ateliers chinois coulent des versoirs incurvés en fonte qui retournent proprement la terre avec un petit attelage.

En Europe, des découvertes de la Bretagne romaine tardive suggèrent des charrues capables de retourner la terre, mais leur forme exacte reste discutée. La charrue lourde à coutre et à versoir se répand dans les plaines argileuses du Nord à partir du VIIe siècle, souvent montée sur roues et tirée par de grands attelages de bœufs. De nouvelles terres sont mises en culture, et les longues parcelles en lanières du village médiéval prennent forme.

Au XVIIIe siècle, des fabricants anglais construisent des charrues plus légères. La charrue de Rotherham, brevetée en Angleterre en 1730 par Joseph Foljambe, a un bâti triangulaire et un versoir garni de fer, et deux chevaux suffisent à la tirer. Dans le Midwest américain, la terre collante de la prairie bourre la fonte. John Lane en 1833 et John Deere en 1837 fabriquent des charrues à lames d'acier lisses qui se nettoient en coupant.

Une charrue en acier autonettoyante : la terre collante de la prairie glisse sur le métal poli.

Des machines à vapeur tirent des charrues au câble à partir des années 1850, puis le tracteur prend le relais au XXe siècle. Une terre nue et retournée s'envole par temps sec et part avec les pluies, comme l'a montré le Dust Bowl américain des années 1930. Beaucoup d'agriculteurs labourent désormais moins, ou plus du tout, et sèment directement dans le chaume.

Chiffres clés

Plus anciennes traces de labour
Sion, Suisse, 5100–4700 av. J.-C.

Profondeur de travail d'une charrue moderne
20 à 30 cm

Charrue lourde à versoir en fer
Chine des Han, Ier–IIe siècle apr. J.-C.

Charrue en acier autonettoyante
Illinois, 1833–1837

Sources

1. Plough · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Plough
2. Ard (plough) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ard_(plough)
3. Europe's oldest plow marks discovered at Anciens Arsenaux site · Archaeology Magazine (archaeologymag.com) https://archaeologymag.com/2024/03/europes-oldest-plow-marks-discovered-at-anciens-arsenaux-site/
4. When was the plough invented? · Joe Roe (archaeologist) https://joeroe.io/2025/08/24/ploughing.html
5. Tillage (chapter 10), D. Franzen · North Dakota State University Extension https://www.ndsu.edu/agriculture/sites/default/files/ebook/Franzen/PDFs/Franzen_Ch10.pdf
6. Development of the Plough: the Rotherham Plough to Now · Farmland Museum and Denny Abbey https://dennyfarmlandmuseum.org.uk/?p=1138
7. Oldest evidence of ploughing in the Czech lands (Bubeneč) · Stone Pages Archaeo News https://www.stonepages.com/news/archives/004695.html
8. Estimating Tillage Draft (TechGuide 2G-210) · Tillers International https://tillersinternational.org/wp-content/uploads/2025/01/EstimatingTillageDraftTechGuide.pdf
9. Matching tillage implements to draught animal potential (F. Inns) · FAO https://www.fao.org/4/w0613t/w0613T0g.htm

Faits vérifiés le 2026-10-11

Charbon de bois

Le bois cuit sous la terre

v. 4 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9), Outils de pierre (p. 5)

Mène à : Bronze (p. 125), Poudre noire (p. 184), Métallurgie du fer (p. 138), Acier (p. 142)

1 Cheminée centrale entre les perches 2 Bois déjà changé en charbon 3 Couche de feuilles, de paille et de mottes
4 Couverture de terre et de poussier 5 Évent au pied de la meule 6 Bois pas encore carbonisé

Le charbon de bois est du bois chauffé avec si peu d'air qu'il se carbonise au lieu de brûler, laissant un combustible noir et léger, fait surtout de carbone. Employé par les métallurgistes depuis au moins le Ve millénaire av. J.-C., puis produit en meules couvertes de terre et en fosses, il leur a donné la chaleur et le gaz réducteur nécessaires pour tirer le cuivre puis le fer de leurs minerais.

Ce que c’est

Le charbon de bois est ce qui reste d’un bois chauffé avec trop peu d’air pour brûler. L’eau et la plupart des matières volatiles partent en fumée, et il reste un solide noir, cassant et léger, composé en grande partie de carbone.

À poids égal, il fournit à peu près deux fois plus de chaleur que le bois séché à l’air. Il brûle presque sans flamme ni fumée et, attisé par un soufflet, atteint des températures qu’un feu de bois tient difficilement. Dans un four, il

forme aussi du monoxyde de carbone, le gaz qui arrache l'oxygène aux minerais. Pendant quelque six mille ans, il a été le combustible du cuivre, du bronze et du fer.

La planche montre la meule couverte de terre que les charbonniers dressaient dans les forêts d'Europe jusqu'au XXe siècle : un dôme de bois empilé autour d'une cheminée centrale, enveloppé de feuilles et de terre, qu'on laisse couver pendant des jours.

Le même bois avant et après : le charbon rétrécit et se fendille, mais garde le dessin de l'arbre.

Comment ça marche

Chauffé, le bois sèche d'abord à 100 °C ou un peu moins, puis monte vers 280 °C. Ces deux étapes consomment de l'énergie, fournie par la combustion d'une petite partie de la charge. Au-delà de 280 °C environ, le bois se décompose de lui-même et dégage de la chaleur. L'eau, des acides, des goudrons et des gaz combustibles s'échappent, et le charbon reste.

La fosse fonctionne de la même façon : le bois se carbonise dans un trou, sous des feuilles et de la terre.

Sans apport extérieur, la réaction plafonne vers 400 °C et le charbon garde environ 30 % de matières goudronneuses. Poussé à 500 °C, il atteint environ 86 % de carbone fixe, mais la chaleur se paie en rendement : rapporté au bois anhydre, on obtient environ 42 % de charbon à 300 °C et 33 % à 500 °C, sans compter le bois brûlé pour chauffer.

La couverture de terre joue le rôle de la paroi d'un four. Elle ne laisse entrer que l'air admis par le charbonnier, à travers des évents au pied de la meule. Un peu de bois brûle, consomme cet oxygène, et sa chaleur cuit le reste. Le feu est allumé dans la cheminée centrale et gagne lentement le tas vers l'extérieur, jusqu'au pied. La fumée renseigne sur l'avancement : épaisse et blanche tant que le bois sèche, bleutée ensuite, presque transparente quand une zone est cuite. En se carbonisant, le bois se tasse, la meule s'affaisse et la couverture se fend. Chaque fente doit être bouchée aussitôt, sinon le charbon se consume en cendre.

Comment s'y prendre

Voici les grandes lignes d'une petite meule. Il faut quelques mètres cubes de feuillus bien secs, chêne, hêtre ou noisetier, refendus pour qu'aucune pièce ne dépasse environ 20 cm d'épaisseur, de la paille ou des feuilles, une terre sableuse ou limoneuse, une pelle, un râteau et une centaine de litres d'eau.

Préparer la place. Dégagez jusqu'à la terre nue un cercle plat et bien drainé d'environ 6 m de diamètre, loin des branches basses et des bâtiments.

Dresser le bois autour de la cheminée. Plantez trois ou quatre perches au centre pour former un conduit. Posez au sol un quadrillage de petits rondins pour que les gaz circulent sous le tas. Dressez les bûches debout contre le

conduit, légèrement inclinées vers lui, bien serrées, et comblez les vides avec du menu bois. Une meule de village mesure en général environ 4 m de diamètre et 1 à 1,5 m de haut.

Couvrir. Étalez des feuilles, de la paille ou des mottes de gazon sur le bois, puis 10 à 20 cm de terre, mêlée de poussier de charbon si vous en avez. Évitez l'argile collante, qui se fend en séchant. Ménagez six à dix évents tout autour du pied.

Allumer et surveiller. Jetez dans la cheminée une pelletée de braises et nourrissez-les de petit bois sec jusqu'à ce que le cœur du tas prenne. Quand une fumée blanche et épaisse monte régulièrement, fermez en partie le sommet. Dès lors, quelqu'un veille sur la meule jour et nuit : on bouche les fentes avec de la terre humide, on ferme tout évent qui rougeoie et on en ouvre de nouveaux du côté qui traîne. Une petite meule peut finir en un ou deux jours ; les meules traditionnelles de taille moyenne demandaient douze à quatorze jours.

Étouffer, refroidir, défourner. Quand la fumée devient fine et bleue, fermez tous les trous et rechargez de la terre. Attendez que la meule soit froide jusqu'au cœur, ce qui demande deux ou trois jours pour une petite, puis ouvrez-la par secteurs, tirez le charbon au râteau et étouffez tout morceau qui rougeoie ou qui fume avec du sable ou un peu d'eau. Le charbon chaud peut se rallumer à l'air libre : restez vigilant.

> **Sécurité.** Une meule peut déclencher un feu de forêt : renseignez-vous sur la réglementation des feux en plein air, gardez la place nue et ayez de l'eau, du sable et une pelle à portée. La fumée est chargée de monoxyde de carbone, inodore et mortel. Restez au vent, ne vous penchez jamais au-dessus d'un évent ou de la cheminée, et ne carbonisez, ne refroidissez ni ne stockez jamais du charbon chaud dans un lieu clos. Ne montez jamais sur la meule : en se tassant, le bois peut laisser la couverture céder sur une cavité incandescente et provoquer de graves brûlures. Portez des gants et des chaussures en cuir, et tenez les enfants à l'écart.

Histoire et évolutions

Le charbon de bois est aussi ancien que l'usage du feu : chaque foyer préhistorique en laisse, et les archéologues s'en servent pour le dater. Dans la grotte Chauvet, en Ardèche, des peintres ont dessiné des animaux au charbon de pin il y a environ 37 000 à 34 000 ans.

Le métal a créé la première grande demande, même si l'on ignore quand on a commencé à le fabriquer exprès. Au Ve millénaire av. J.-C., au Levant méridional et sur le plateau iranien, on réduisait le minerai de cuivre avec du charbon dans des creusets et de petits fours. À Horvat Beter, près de Beer-Sheva, le minerai venait du Wadi Faynan, à plus de 100 km. Une estimation publiée en 1982, tirée d'archives plus tardives et d'expériences, compte 20 à 40 kg de charbon par kilo de cuivre. Avec 100 kg de charbon pour une fonte de 5 kg, et sept parts de bois pour une de charbon, cela fait quelque 700 kg de bois. En Chine, les plus anciens fours à charbon connus, à Xiwubi dans le Shanxi, voisinaient avec des vestiges de réduction du cuivre de la période d'Erlitou, vers 1900 à 1600 av. J.-C.

Selon la même estimation, le fer ne demandait pas plus de 10 kg de charbon par kilo, forgeage compris, mais on en produisait bien davantage, et le charbonnage devint un métier de la forêt. Dans le Weald anglais comme dans la vallée de Carranza, au Pays basque, les charbonniers ont alimenté forges et ferronneries pendant des siècles, travaillant du printemps à l'automne et logeant en famille dans des huttes près des meules.

Au XVIIIe siècle, un haut fourneau anglais consommait environ huit tonnes de bois, transformées en deux tonnes de charbon, pour chaque tonne de fonte. En 1709, Abraham Darby réduisit le fer au coke, tiré de la houille, à Coalbrookdale, et le coke s'imposa peu à peu. Le charbon de bois a survécu ailleurs : en 2011, il produisait encore environ 30 % de la fonte brésilienne, contre moins de 1 % dans le monde, à partir de plantations d'eucalyptus mais

aussi de forêt naturelle. Il reste aussi le combustible du barbecue, le fusain de saule de l’artiste et, une fois activé, le carbone des filtres.

Les charbonniers vivaient près de leurs meules dans des huttes de perches et de mottes, pour les surveiller jour et nuit.

Chiffres clés

Carbonisation spontanée

À partir d'environ 280 °C ; un bon charbon s'achève vers 500 °C

Teneur en carbone

Environ 68 % de carbone fixe à 300 °C, environ 86 % à 500 °C

Plus anciens fours à charbon connus en Chine

Xiwubi (Shanxi), vers 1900–1600 av. J.-C., à côté de vestiges de réduction du cuivre

Rendement d'une meule

1 t de charbon pour 4 t de bois sec à l'air dans de bonnes conditions, plus souvent 1 pour 6

Combustible du cuivre (estimation)

Environ 20 à 40 kg de charbon par kilo de cuivre, d'après des archives plus tardives et des expériences

Sources

1. Simple technologies for charcoal making, chapter 4: Carbonisation processes (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/x5328e/x5328e05.htm
2. Simple technologies for charcoal making, chapter 6: Making charcoal in earth mounds (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/X5328E/x5328e07.htm
3. Simple technologies for charcoal making, chapter 5: Earth pits for charcoal making (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/x5328e/x5328e06.htm
4. Fuel for the Metal Worker (Lee Horne, Expedition 25.1, 1982) · Penn Museum https://www.penn.museum/sites/expedition/fuel-for-the-metal-worker/
5. Charcoal Burning: Keeping an Ancient Craft Alive · Weald & Downland Living Museum https://www.wealddown.co.uk/museum-news/charcoal-burning/
6. Charcoal burning in the valley of Carranza (Bizkaia) · Labayru Fundazioa https://labayru.eus/en/basque-ethnography-at-a-glance/charcoal-burning-in-the-valley-of-carranza-bizkaia
7. Charcoal Burning (Wyre Forest) · Revolutionary Players, History West Midlands https://revolutionaryplayers.org.uk/?p=2368
8. The Chauvet cave: 30 years since its discovery. Contribution from radiocarbon dating · Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) https://www.lsce.ipsl.fr/en/the-chauvet-cave-30-years-since-its-discovery-contribution-from-radiocarbon-dating/
9. Archaeologists Unearth 6,500-Year-Old Copper-Smelting Workshop in Israel · Sci.News https://www.sci.news/archaeology/copper-smelting-workshop-horvat-beter-israel-08923.html
10. Shanxi discovers earliest charcoal kiln relics in China · China Daily https://regional.chinadaily.com.cn/shanxi/2021-08/23/c_654303.htm
11. Invention of Coke Smelting · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/history/invention-coke-smelting
12. Sustainable charcoal (Pesquisa FAPESP 189, 2011) · Pesquisa FAPESP https://revistapesquisa.fapesp.br/en/carvao-vegetal-sustentavel/

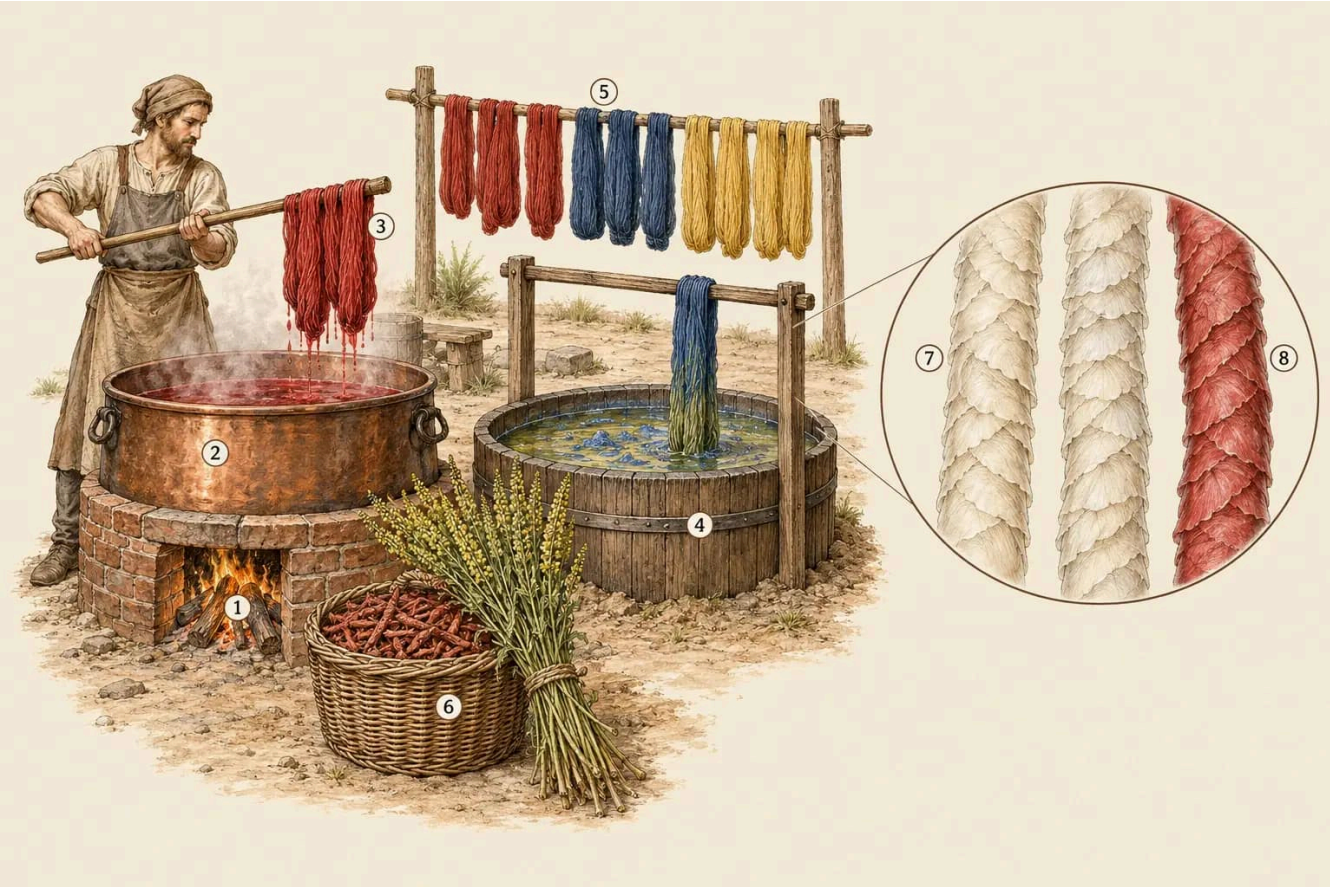
Faits vérifiés le 2026-10-13

Teinture

La couleur fixée dans la fibre

v. 4 200 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Corde & cordage (p. 13), Céramique (p. 23), Maîtrise du feu (p. 9)



1 Feu sous la chaudière 2 Chaudière de cuivre et bain de garance 3 Écheveaux soulevés sur un bâton 4 Cuve d'indigo
5 Perche de séchage aux écheveaux rouges, bleus et jaunes 6 Racines de garance et gaude 7 Fibre de laine brute
8 Fibre mordancée et teinte en rouge

La teinture fait entrer la couleur dans la fibre : le colorant pénètre le fil ou l'étoffe et résiste au lavage. La plupart des teintures végétales, comme la garance et la gaude, donnent des couleurs plus fortes et plus solides avec un mordant, en général l'alun, tandis que l'indigo est rendu soluble dans une cuve puis redevient bleu à l'air.

Ce que c’est

Une peinture reste à la surface du tissu et peut s’user ; un colorant entre dans la fibre, dissous dans l’eau, et y reste au lavage. La plupart des colorants venaient des plantes, quelques-uns d’insectes et de coquillages.

Sur une laine non mordancée, la racine de garance, le rouge classique, et la gaude, le jaune classique, donnent des teintes plus faibles, qui passent et partent plus facilement au lavage. Les teinturiers les fixaient avec un mordant, un sel métallique déposé d’abord sur la fibre et auquel le colorant s’accroche ; pendant la plus grande partie de

l'histoire, ce fut l'alun. L'indigo, le bleu, ne se dissout pas du tout dans l'eau : il faut le transformer chimiquement dans une cuve avant qu'il puisse entrer dans le fil.

La planche montre une cour de teinturier de la fin du Moyen Âge : un bain de garance dans une chaudière de cuivre (2) au-dessus du feu (1), des écheveaux levés sur un bâton (3), la cuve d'indigo (4), le fil qui sèche sur une perche (5) et les matières tinctoriales (6). Dans le cercle, à la loupe, une fibre de laine brute (7) voisine avec une fibre passée à l'alun, encore pâle, et une fibre mordancée puis teinte (8).

Comment ça marche

Le rouge de la garance vient de composés de ses racines, surtout l'alizarine et la purpurine. Seuls, ils donnent à la laine un orangé plus faible et plus terne, qui passe plus vite. Si la laine a d'abord mijoté dans l'alun, un sulfate double d'aluminium et de potassium, elle fixe de l'aluminium ; dans le bain de teinture, les molécules de garance s'y lient et forment un composé coloré qui ne se dissout plus, retenu dans la fibre. Le mordant règle aussi la nuance : la garance donne du rouge avec l'alun et des bruns violacés avec le fer, la gaude un jaune vif avec l'alun et un olive avec le fer.

Garance, pastel et gaude : le rouge, le bleu et le jaune des teinturiers d'Europe.

À la sortie de la cuve, le fil est jaune-vert ; l'air le fait virer au bleu.

L'indigo se forme à partir de composés des feuilles des indigotiers tropicaux et, en Europe, du pastel. Dans une cuve alcaline privée d'oxygène, la molécule bleue, insoluble, est réduite : elle gagne de l'hydrogène et devient le leuco-indigo, une forme jaune-vert soluble qui imprègne la fibre. Hors de la cuve, l'oxygène de l'air la ramène à l'indigo bleu, désormais pris dans la fibre. Chaque trempage ajoute une couche, et les bleus sombres en demandent beaucoup.

Avant la chimie industrielle, ce sont des bactéries qui réduisaient l'indigo. On gardait le pastel ou l'indigo au chaud dans de l'eau avec un alcali, lessive de cendres ou chaux éteinte, et du son pour les nourrir ; en fermentant, elles consommaient l'oxygène et changeaient l'indigo en leuco-indigo. Les verts s'obtenaient en teignant en jaune par-dessus un bleu.

Comment s'y prendre

Voici les grandes lignes de la méthode traditionnelle pour la laine, pas une recette éprouvée. Il faut du fil de laine, de l'alun, de la garance et de la gaude séchées, et des marmites en inox ou en émail intact, des bâtons et un thermomètre réservés à la teinture.

Préparer la fibre. Mettre le fil en écheveaux lâches, liés en plusieurs points pour que la teinture atteigne chaque brin. Le dégraisser dans de l'eau tiède au savon doux. Toujours le plonger mouillé et changer la température lentement : les chocs de chaleur et le frottement feutrent la laine.

Mordancer. Maiwa, un fournisseur canadien de teintures naturelles, indique l'alun à 15 % du poids de laine sèche. Le dissoudre dans de l'eau chaude, ajouter la laine, monter lentement vers 90 °C, juste sous le frémissement, et maintenir une heure environ. Laisser refroidir et rincer.

Teindre en rouge ou en jaune. Faire tremper la garance hachée une nuit, puis la chauffer doucement avec la laine mordancée une heure ou plus, en retournant le fil sans brusquer. Pour la garance d'Europe, Maiwa conseille de rester sous 72 °C environ : plus chaud, le rouge tourne au brun. La gaude infuse une nuit, puis on la chauffe et on la filtre ; la laine mordancée passe ensuite une heure environ dans ce bain, lui aussi tenu sous 71 °C environ, car trop de chaleur ternit le jaune. Laisser refroidir dans le bain fonce la teinte.

Teindre en bleu. Une cuve traditionnelle de pastel ou d'indigo, montée avec un alcali et du son, restait plusieurs jours au chaud, jusqu'à ce que le liquide jaune-vert se couvre d'une peau cuivrée et d'une mousse bleue. Le fil y entre mouillé et lentement, sans éclabousser, car l'air gâte la cuve ; après le temps que fixe la méthode, souvent de 20 minutes à une heure pour la laine, on le sort, on l'essore, on le laisse bleuir et on le replonge. Les cuves actuelles emploient d'autres réducteurs, et la laine demande un bain moins alcalin que le coton (Maiwa indique un pH de 9 à 10 contre 11 à 12) : suivre une méthode éprouvée, écrite pour la laine, et contrôler le pH.

Rincer et laver. Après la garance ou la gaude, laisser refroidir le fil dans le bain, le rincer doucement jusqu'à ce que l'eau reste claire et le sécher à l'ombre ; ne le laver au savon doux que plus tard. Après l'indigo, laisser le bleu se développer entièrement à l'air, rincer à l'eau claire, puis faire tremper le fil dans du vinaigre dilué pour neutraliser l'alcali resté dans la laine. Le laver en dernier et vérifier qu'il ne dépose pas de bleu sur un chiffon blanc.

> **Sécurité.** Les bains chauds ébouillantent : poser la marmite sur un feu ou un réchaud stable, loin des enfants et des animaux. L'alun est irritant et ne doit pas être avalé ; les sels de fer sont nocifs en solution concentrée. La chaux éteinte et la lessive brûlent la peau et les yeux, la lessive attaque aussi les marmites en aluminium, et les réducteurs peuvent dégager des vapeurs toxiques, surtout au contact d'un acide : porter lunettes et gants, les stocker au sec et étiquetés. Les cuves en fermentation dégagent des gaz nauséabonds : travailler dehors ou dans un lieu bien aéré. Ne jamais utiliser de casseroles ni d'ustensiles de cuisine, et ne jamais rendre le matériel de teinture à la cuisine. Les mordants au chrome et à l'étain, courants autrefois, sont toxiques : ne pas les employer. Les bains usés ne sont pas anodins : bains de mordant ou de fer et boues de cuve contiennent des sels métalliques ou de l'alcali. Ne jamais les verser dans un cours d'eau, un puits ou un égout pluvial ; demander au service local des déchets comment s'en débarrasser.

Histoire et évolutions

Dans la grotte de Dzudzuana, en Géorgie, des couches de plus de 30 000 ans contenaient des fibres colorées où les fouilleurs voient du lin teint avec des plantes locales ; la teinture reste une interprétation, et l'identification du lin a été contestée.

Le plus ancien indigo connu, identifié par analyse chimique, colore un coton de Huaca Prieta, au Pérou, vieux d'environ 6 200 à 6 000 ans. La plus ancienne garance confirmée colore un carquois de cuir égyptien daté d'environ 2124 à 1981 av. J.-C.

Des coquillages venait la pourpre associée à Tyr : des amas de coquilles broyées attestent sa production en Crète au début du IIe millénaire av. J.-C., puis à Ougarit, en Syrie, aux XVe et XIVe siècles av. J.-C. Le kermès, une cochenille du chêne kermès, donnait un cramoisi ; la cochenille d'Amérique, arrivée en Europe au XVIe siècle, l'a peu à peu supplanté.

Au Moyen Âge, les teinturiers se groupent en corporations qui gardent leurs recettes et contrôlent la qualité ; celle de Londres, mentionnée en 1188, reçoit en 1471 une charte qui l'autorise à inspecter les ateliers et à mettre à l'amende les mauvaises teintures.

En 1856, William Henry Perkin, étudiant londonien de 18 ans qui cherchait à fabriquer de la quinine, obtient à partir de dérivés du goudron de houille la mauvéine, le premier colorant de synthèse à réussir commercialement.

En 1868, Carl Graebe et Carl Liebermann synthétisent l’alizarine, et la culture de la garance décline vite ; Adolf von Baeyer publie une synthèse de l’indigo en 1880, et BASF le met sur le marché en 1897.

Chaque coquillage ne donnait que quelques gouttes de teinture ; il en fallait des milliers pour teindre à l’échelle du commerce.

Chiffres clés

Plus ancien indigo connu

Sur un coton de Huaca Prieta (Pérou), vieux d'environ 6 200 à 6 000 ans

Garance en Égypte

Identifiée sur un carquois de cuir daté d'environ 2124 à 1981 av. J.-C.

Premier colorant de synthèse commercial

La mauvéine, obtenue en 1856 par William Henry Perkin, 18 ans

Fibres colorées plus anciennes

Fibres de la grotte de Dzudzuana (Géorgie), plus de 30 000 ans ; lin contesté, teinture déduite

Corporation des teinturiers de Londres

Mentionnée dès 1188 ; charte royale en 1471

Sources

1. 30,000-year-old wild flax fibers: testimony for fabricating prehistoric linen (Science, 2009) · Kvavadze, Bar-Yosef et al., Harvard DASH https://dash.harvard.edu/handle/1/4270521
2. Early pre-Hispanic use of indigo blue in Peru (Science Advances, 2016) · Splitstoser, Dillehay, Wouters and Claro https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5023320/
3. The matter of madder in the ancient world · J. Paul Getty Museum https://www.getty.edu/publications/mummyportraits/part-one/3/
4. The Minoan origin of Tyrian purple (Biblical Archaeologist, 1994) · Robert R. Stieglitz, republished by Keftiu https://www.keftiu.com/magazine/the-minoan-origin-of-tyrian-purple/
5. The Dyers' Company and dyeing · The Worshipful Company of Dyers, London https://www.dyerscompany.co.uk/?p=4304
6. Graebe, Carl · Neue Deutsche Biographie https://www.deutsche-biographie.de/118877364.html
7. William Henry Perkin · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/historical-profile/william-henry-perkin
8. História da BASF, 1865–1901 · BASF https://www.basf.com/br/pt/who-we-are/organization/history/1865-1901
9. Response to comment on "30,000-year-old wild flax fibers" (Science, 2010) · Kvavadze et al., Hebrew University of Jerusalem https://cris.huji.ac.il/en/publications/response-to-comment-on-30000-year-old-wild-flax-fibers/
10. Natural dye instructions: scouring, mordanting and dyeing · Maiwa https://naturaldyes.ca/instructions
11. Madder: dyeing instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/madder
12. Weld: dyeing instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/weld
13. Indigo: vat instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/indigo

Faits vérifiés le 2026-10-13

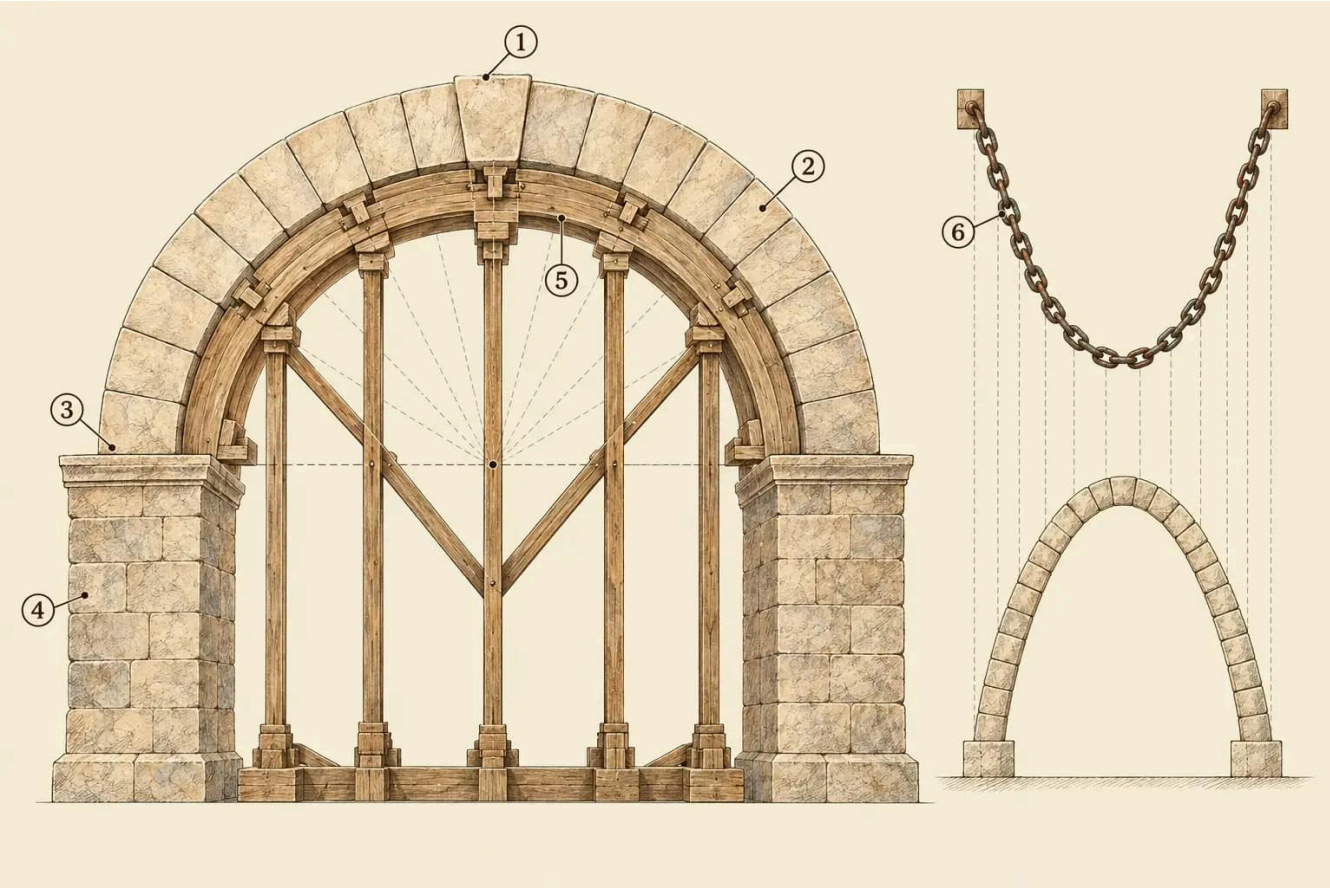
Arc et voûte

Des pierres qui se tiennent entre elles

v. 3 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Briques (p. 40), Outils de pierre (p. 5)

Mène à : Aqueduc (p. 147)



1 Clé 2 Voussoir 3 Sommier 4 Culée (pile) 5 Cintre en bois 6 Chaînette suspendue (modèle de Hooke)

Un arc franchit une ouverture avec des blocs en forme de coin qui s'appuient les uns sur les autres : toute la courbe travaille en compression et pousse ses appuis vers l'extérieur. Prolongé en profondeur, il devient une voûte, et tourné autour de son axe, une coupole : ces formes couvrent tombes, ponts, aqueducs et cathédrales depuis plus de cinq mille ans.

Ce que c'est

Un arc porte la charge située au-dessus d'une ouverture sur une courbe de blocs taillés en coin, les voussoirs. Chaque bloc presse sur ses voisins : l'anneau entier travaille en compression et aucun joint n'a à résister à la traction. La pierre et la brique résistent bien à l'écrasement mais cassent dès qu'on les plie : un linteau de pierre se fend sur une portée qu'un arc de la même pierre franchit sans peine.

Dans un arc en encorbellement, chaque assise est posée à plat et dépasse un peu celle du dessous, jusqu'à ce que les deux côtés se rejoignent ; chaque pierre tient parce que la maçonnerie charge son extrémité arrière. Ainsi posées, les assises peuvent couvrir un couloir et même une chambre ronde, maintenue par la terre ou la

maçonnerie qui l'entoure. Dans un arc clavé, les joints sont d'équerre avec la courbe, et dans un arc en plein cintre ils visent tous son centre ; les blocs s'appuient les uns contre les autres, et l'anneau pousse ses appuis vers l'extérieur.

Le bloc du sommet est la clé. Les plus bas, de chaque côté, sont les sommiers ; ils reposent sur les piles ou les murs qui portent l'arc, les culées.

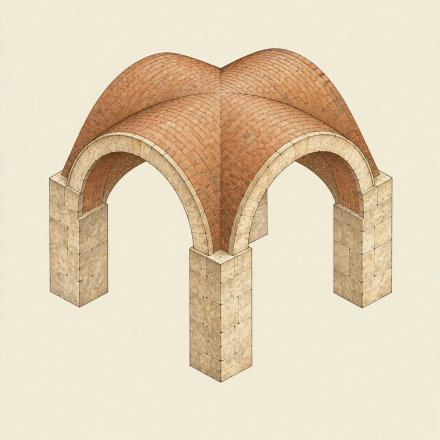
Une ouverture en encorbellement : tous les joints sont horizontaux, et chaque pierre est retenue par le mur qui pèse sur sa queue.

Comment ça marche

Le poids qui vient d'en haut presse chaque voussoir vers le bas. Ses faces sont obliques : il ne peut descendre sans écarter ses voisins, et la charge passe de bloc en bloc jusqu'aux sommiers. Là, l'effort appuie vers le bas mais pousse aussi vers l'extérieur. Cette composante horizontale est la poussée. Si une culée penche ou glisse, la portée s'élargit, la clé s'affaisse et l'arc peut tomber. Plus l'arc est surbaissé, plus la poussée est forte.

Le trajet de cet effort dans les pierres est la ligne de poussée. Depuis les années 1960, à la suite de Jacques Heyman, les ingénieurs calculent la maçonnerie comme si elle ne supportait aucune traction, ne glissait pas et ne s'écrasait pas. Les contraintes restent faibles dans la plupart des arcs, et la rupture par écrasement y est rarement déterminante. Un arc tient alors si au moins une ligne de poussée peut passer à l'intérieur de son épaisseur. Là où la ligne atteint le bord d'un joint, celui-ci peut s'ouvrir comme une charnière ; quand assez de rotules se forment, en général quatre, l'anneau s'effondre.

En 1675, Robert Hooke a livré dans une anagramme latine la règle de l'arc idéal : suspendre une chaîne, puis retourner sa courbe. Une chaîne ne peut que tirer, elle prend donc d'elle-même la forme que demandent ses charges ; retournée, cette courbe les porte en pure compression.



Une voûte d'arêtes : là où deux berceaux se croisent, la poussée se rassemble aux quatre angles.

Une voûte en berceau est un arc prolongé en profondeur. Elle pousse sur toute sa longueur, et ses murs latéraux doivent être épais. Deux berceaux qui se croisent à angle droit forment une voûte d'arêtes ; sa poussée se concentre aux angles, et l'on peut percer de fenêtres les murs qui les séparent. Une coupole est un arc tourné autour de son axe vertical. Ses anneaux horizontaux se tiennent entre eux, si bien qu'on peut la laisser ouverte au sommet. La plupart des voûtes et des coupoles ne tiennent pas avant d'être fermées : on les bâtit donc sur un cintre, un coffrage provisoire en bois taillé à la courbe de l'intrados.

Comment le construire

Un arc de brique d'environ 60 cm de portée, posé au sol comme pièce d'essai, convient à un premier travail à deux. Il faut des briques, du mortier de chaux hydraulique, des planches, des liteaux, des clous, deux paires de coins en

bois dur, un niveau et une ficelle.

Asseoir les culées. Sur une assise ferme et de niveau, monter deux massifs de brique pleins, longs d'au moins 30 cm, larges d'une longueur de brique et hauts de quatre rangs au plus. Caler contre leur face extérieure de grosses pierres ou de la terre damée, afin que leur pied ne puisse ni glisser ni basculer vers l'extérieur.

Faire le cintre. Tracer le demi-cercle en grandeur réelle avec la ficelle fixée en son centre. Découper dans des planches deux fermes à cette courbe, moins l'épaisseur des liteaux, et clouer les liteaux en travers. Poser le cintre sur des étais, une paire de coins sous chacun, au niveau du haut des culées.

Poser l'anneau. Poser chaque brique sur chant, sa longueur dans l'épaisseur de l'arc : l'anneau a ainsi environ 10 cm de hauteur et une longueur de brique d'épaisseur. Partir des deux sommiers et monter de chaque côté à tour de rôle, pour charger le cintre de façon égale. Vérifier à la ficelle que chaque joint vise le centre, et laisser les joints de mortier prendre la forme du coin, plus épais à l'extérieur. Placer la clé en dernier, d'une poussée ferme, sans grands coups.

Attendre, puis décintrer. Protéger l'ouvrage frais du soleil, de la pluie et du gel, et le garder humide comme l'indique le fabricant du mortier. Laisser le cintre au moins une semaine, davantage par temps froid ou humide : retirer l'appui trop tôt est une cause fréquente d'effondrement. Desserrer ensuite les coins de quelques millimètres à la fois, en alternant les côtés. Si la clé descend ou qu'un joint s'ouvre, s'arrêter, remettre le cintre en charge sous l'anneau et chercher la cause avant de reprendre.

Essayer d'abord sur maquette. Suspendre une chaînette fine devant une planche verticale et tracer sa courbe. Scier dans une planchette de petits blocs légèrement en coin, chaque joint d'équerre avec le trait, et les assembler sur un carton découpé à la même courbe, avec une butée à chaque pied. Retirer le carton : si les blocs sont bien taillés, l'arc tient sans colle.

> **Sécurité.** Soulever briques et pierres près du corps, genoux fléchis, et porter à deux les pièces lourdes. Mettre gants et lunettes. Éviter de couper brique ou pierre, dont la poussière contient de la silice ; s'il le faut, couper dehors, à la scie à eau ou au ciseau, avec un masque FFP3 bien ajusté. Le mortier de chaux est caustique : protéger peau et yeux, rincer aussitôt les éclaboussures. Ne jamais se tenir ni passer le bras sous l'arc pendant le décintrement ; travailler de côté avec un long bâton et tenir tout le monde à l'écart. Tout arc plus grand ou plus haut, ou destiné à porter un mur, un passage ou des personnes, demande un projet vérifié par un maçon ou un ingénieur.

Histoire et évolutions

Les arcs clavés apparaissent en Mésopotamie et en Égypte au IVe millénaire av. J.-C., en brique crue, surtout dans des égouts et des tombes. Dès la Ire dynastie, vers 3000 av. J.-C., les Égyptiens bâtissent des voûtes sans cintre en posant les briques par anneaux inclinés contre un mur de fond, une méthode encore pratiquée en Nubie. À Tel Dan, dans le nord d'Israël, l'une des plus anciennes portes en arc connues, en brique crue, bâtie avant 1700 av. J.-C. environ, tient encore debout avec son arc conservé.

L'encorbellement reste en usage : le Trésor d'Atrée à Mycènes, une tombe de l'âge du bronze récent, possède une coupole en encorbellement de 14,5 m de diamètre. Les Romains sont les premiers à élever des arcs isolés : ponts, arcades d'aqueducs comme le pont du Gard, voûtes et coupoles de béton comme celle du Panthéon, large de 43,3 m.

L'arc brisé, déjà courant dans l'architecture islamique, gagne l'Europe occidentale dans la seconde moitié du XIe siècle ; à portée égale, il pousse moins vers l'extérieur qu'un arc en plein cintre. Le chœur de Saint-Denis, près de Paris (1140-1144), réunit arcs brisés, voûtes d'ogives et contreforts extérieurs. Vers 1160, les bâtisseurs d'Île-de-

France ajoutent des arcs-boutants, des demi-arcs qui reportent la poussée de la voûte haute par-dessus les bas-côtés jusqu'à des culées extérieures. La poussée étant reportée au-dehors, les murs entre les piles peuvent s'amincir et s'ouvrir de grands vitraux. À Beauvais, la voûte du chœur monte à environ 48 m ; une partie s'effondre en 1284.

Un arc-boutant : un demi-arc porte la poussée de la voûte par-dessus le bas-côté jusqu'à une pile dressée à l'extérieur.

Chiffres clés

Premiers arcs clavés
Mésopotamie et Égypte, IVe millénaire av. J.-C., en brique crue

Une des premières portes en arc encore debout
Tel Dan, brique crue, bâtie avant 1700 av. J.-C. environ

Arc en plein cintre le plus mince, en théorie
Environ 0,107 fois son rayon, avec des joints rayonnants et sous son seul poids

Voûte du chœur de Beauvais
Environ 48 m de haut ; une partie s'est effondrée en 1284

Sources

1. The Origins of the Voussoir Arch (A. Hrychuk Kontokosta, in The Roman Arch, 2025) · Oxford University Press https://academic.oup.com/book/61689/chapter/540990895
2. Mud-Brick (V. L. Emery, UCLA Encyclopedia of Egyptology, 2011) · University of California, Los Angeles https://journalpub.escholarship.org/nelc_uee/article/4007/galley/2583/download
3. The Remarkable Discoveries at Tel Dan (J. C. H. Laughlin, Biblical Archaeology Review 7:5, 1981) · Center for Online Judaic Studies https://cojs.org/the-remarkable-discoveries-at-tel-dan/
4. Brick Brief: Arches · Brick Industry Association https://www.gobrick.com/media/file/brick-brief-arches-may-2012.pdf
5. The effect of stereotomy on the shape of the thrust-line and the minimum thickness of masonry arches (N. Makris and H. Alexakis, 2013) · Archive of Applied Mechanics, Aston University https://research.aston.ac.uk/en/publications/the-effect-of-stereotomy-on-the-shape-of-the-thrust-line-and-the-
6. Arches, vaults and buttresses (S. Huerta, seminar, 2015) · University of Pisa, School of Engineering https://docenti.ing.unipi.it/scuola_dottorato_ingegneria/Seminari2015/2015-Huerta-Seminario1.pdf
7. The stone skeleton (J. Heyman, International Journal of Solids and Structures 2, 1966, pp. 249-279) · Elsevier https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90018-7
8. As hangs the flexible line: equilibrium of masonry arches (P. Block, M. DeJong and J. Ochsendorf, Nexus Network Journal 8:2, 2006) · Springer https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9
9. Maths in a minute: St Paul's dome · Plus Magazine, University of Cambridge https://plus.maths.org/content/maths-minute-st-pauls-dome
10. Hanging models · Stereotomy Semantic Classification, University of Porto https://ssc.arq.up.pt/semantic-classification/hanging-models/
11. Compound brick vaults by slices in written sources (R. Marín-Sánchez et al., 2021) · Universitat Politècnica de València https://riunet.upv.es/bitstreams/f756ca9a-0877-4029-9a69-dd09bc7f3735/download
12. Treasury of Atreus · J. Siegel, Hampden-Sydney College https://blogs.hsc.edu/drjclassics/?p=379
13. Arch · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Arch
14. Centering (masonry) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Centering_(masonry)
15. Flying buttress · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Flying_buttress
16. Beauvais Cathedral · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Beauvais_Cathedral

Faits vérifiés le 2026-10-14

Bière

Le sucre du grain changé en alcool

v. 3 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Céramique (p. 23), Pain (p. 27)

1 Orge maltée 2 Cuve d'empâtage 3 Chaudière de brassage 4 Bac refroidissoir 5 Cuve de fermentation 6 Tonneaux

La bière naît de l'amidon d'un grain germé, transformé en sucre puis fermenté en alcool par la levure. Les traces chimiques de bière d'orge remontent au IVe millénaire av. J.-C. dans l'ouest de l'Iran, et le brassage a suivi l'agriculture presque partout où l'on cultivait des céréales.

Ce que c’est

La bière est une boisson fermentée à base de céréale, le plus souvent l’orge, d’eau, de levure et en général de houblon. La levure ne sait pas se nourrir d’amidon : on malte puis on empâte d’abord le grain pour changer son amidon en sucres que la levure fermente en alcool et en gaz carbonique.

La planche montre une petite brasserie comme on en voyait en Europe avant la machine à vapeur, avec les cuves alignées dans l’ordre du travail : malt, cuve d’empâtage, chaudière, bac refroidissoir, cuve de fermentation et tonneaux.

Comment ça marche

On commence par malter l'orge : on la fait tremper puis germer pendant plusieurs jours. En se mettant à pousser, la graine produit des enzymes qui serviront plus tard à dégrader sa propre réserve d'amidon. Le malteur sèche ensuite le grain au touraillage pour arrêter la germination ; la chaleur fixe aussi la couleur et le goût du malt, du plus pâle au plus torréfié.

À l'empâtage, le malt concassé infuse dans l'eau chaude. Entre 62 et 68 °C environ, les amylases du malt découpent l'amidon en sucres, surtout du maltose, en une heure à peu près. Un empâtage plus frais laisse davantage de sucres fermentescibles et donne une bière plus sèche ; un empâtage plus chaud laisse plus de sucres non fermentescibles et une bière plus ronde. Le liquide sucré, le moût, est soutiré à travers les enveloppes du grain, qui servent de filtre.

Le maltage : le grain qui germe fabrique les enzymes du brassage, et le touraillage l'arrête avant qu'il ait consommé son amidon.

On fait ensuite bouillir le moût une heure ou plus. L'ébullition tue la plupart des microbes venus avec le grain, arrête les enzymes et chasse des arômes indésirables. Le houblon ajouté à ce stade apporte des composés amers qui freinent aussi bien des bactéries d'altération ; ajouté vers la fin, il garde davantage de parfum.

Enfin, on refroidit le moût et on y ajoute la levure. En quelques jours, elle transforme le sucre en éthanol et en gaz carbonique, avec les esters et autres composés qui font le goût. La levure de fermentation haute travaille au chaud et remonte à la surface ; celle de fermentation basse, pour la lager, travaille au frais et se dépose au fond. Une période de garde laisse ensuite la bière se clarifier et mûrir.

Comment la faire

On peut brasser une dizaine de litres dans une cuisine avec la méthode du brassage en sac. Il faut 2,5 kg de malt pâle concassé, environ 25 g de houblon, un sachet de levure de fermentation haute, une marmite de 20 litres, un grand sac à mailles, un thermomètre, un fermenteur avec barboteur, un densimètre, un désinfectant sans rinçage, et des bouteilles avec des capsules neuves.

Empâter. Chauffez 14 litres d'eau vers 70 °C, placez le sac dans la marmite et versez le malt en remuant. La maische doit se stabiliser vers 66 °C. Coupez le feu, puis couvrez la marmite et enveloppez-la d'une couverture pendant une heure, bien à l'écart du brûleur. Retirez la couverture, sortez le sac et laissez-le s'égoutter.

Faire bouillir. Portez le moût à gros bouillons pendant 60 minutes. Mettez la plus grande partie du houblon au début pour l'amertume, et le reste dans les dix dernières minutes pour l'arôme. Surveillez la montée en ébullition : la mousse monte très vite. Pendant ce temps, nettoyez et désinfectez le fermenteur et tout ce qui touchera le moût refroidi ; un serpentin propre se désinfecte en le plongeant dans le moût bouillant pendant les 15 dernières minutes.

Refroidir et fermenter. Refroidissez la marmite couverte jusqu'à 20 °C environ avec le serpentin ou dans un évier d'eau froide. Versez le moût dans le fermenteur, ajoutez la levure, posez le barboteur et gardez le tout entre 18 et 20 °C.

Embouteiller. La fermentation dure en général une à deux semaines. N'embouteillez que lorsque le densimètre donne la même valeur trois jours de suite et que cette valeur est proche de la densité finale attendue, environ 1,010 à 1,015 pour cette recette : une valeur stable mais plus haute signale une fermentation bloquée, pas

terminée. Dissolvez 5 à 6 g de sucre par litre dans un peu d'eau bouillie, mélangez-le doucement à la bière, remplissez et capsulez les bouteilles, puis laissez-les deux semaines à température ambiante avant de les mettre au frais.

> **Sécurité.** Une marmite de moût bouillant peut provoquer de graves brûlures : posez-la sur un feu stable, ne la soulevez qu'à deux ou pas du tout, et éloignez enfants et animaux. À l'intérieur, n'utilisez qu'une plaque ou une cuisinière prévue pour cet usage ; un réchaud vendu pour l'extérieur reste dehors. Trop de sucre d'amorçage, ou une mise en bouteille avant la fin de la fermentation, peut faire éclater les bouteilles : utilisez de vraies bouteilles à bière, pesez le sucre et portez des lunettes de protection pour manipuler un lot qui semble trop gazeux. N'essayez jamais de distiller la bière. Respectez la loi locale sur le brassage domestique et sur l'alcool.

Histoire et évolution

En Mésopotamie, on partageait une jarre et on aspirait la bière avec de longues pailles qui passaient sous les enveloppes flottantes.

Des résidus dans des mortiers de pierre de la grotte de Raqefet, en Israël, vieux d'environ 13 000 ans, ont été interprétés comme les traces d'un breuvage en forme de bouillie, préparé par des chasseurs-cueilleurs natoufiens pour des repas funéraires ; cette lecture est discutée. Une trace chimique ancienne et souvent citée vient de Godin Tepe, dans l'ouest de l'Iran : les rainures d'une cruche de la fin du IVe millénaire av. J.-C. renferment de l'oxalate de calcium, la « pierre de bière » que la bière d'orge dépose dans les cuves. L'oxalate de calcium n'est pas propre à la bière, si bien que cette lecture a elle aussi été contestée.

Les tablettes mésopotamiennes citent la bière des milliers de fois, sans jamais en donner la recette. Le texte qui s'en approche le plus est l'Hymne à Ninkasi, déesse du brassage, mis par écrit vers 1800 av. J.-C., qui évoque le malt mis à tremper, la maische étalée sur des nattes de roseau et les cuves remplies. En Égypte, la bière était un aliment de base, et l'on a fouillé à Abydos une grande brasserie d'environ 3000 av. J.-C.

Au Moyen Âge, les brasseurs européens aromatisaient la bière au gruit, un mélange d'herbes. L'abbé Adalhard de Corbie mentionne le houblon pour la bière en 822, et la bière houblonnée, qui se conservait mieux, s'imposa lentement au fil des siècles. Le 23 avril 1516, à Ingolstadt, les ducs de Bavière décidèrent que la bière ne contiendrait que de l'orge, du houblon et de l'eau. La levure n'y figurait pas, car on ne comprenait pas encore son rôle dans la fermentation ; Louis Pasteur montra dans les années 1850 que celle-ci était l'œuvre de cellules vivantes. Au laboratoire Carlsberg de Copenhague, Emil Christian Hansen découvrit que des levures sauvages mêlées à la levure de brasserie causaient la « maladie de la bière ». Il cultiva une levure pure à partir d'une seule bonne cellule, utilisée pour la première fois à pleine échelle en novembre 1883, et la lager devint bien plus régulière. Carlsberg donna cette levure aux autres brasseurs.

Les glandes jaunes de lupuline, à l'intérieur du cône de houblon, contiennent les résines amères et l'arôme.

Chiffres clés

Trace chimique ancienne de bière d'orge (discutée)
Godin Tepe, Iran, fin du IVe millénaire av. J.-C.

Température d'empâtage habituelle
Environ 62 à 68 °C, là où les enzymes du malt dégradent le mieux l'amidon

Loi bavaroise de pureté
23 avril 1516, Ingolstadt : orge, houblon et eau seulement

Première levure en culture pure utilisée en production
Carlsberg, Copenhague, novembre 1883

Sources

1. Five things I learned about Sumerian beer · University of Chicago Magazine https://mag.uchicago.edu/arts-humanities/five-things-i-learned-about-sumerian-beer
2. Purifying yeast · Carlsberg Group https://www.carlsberggroup.com/pursuit-of-better/scientific-discoveries/purifying-yeast/
3. 500 Jahre Reinheitsgebot: Deutsches Bier, was darf rein und was ist drin · Stiftung Warentest https://www.test.de/500-Jahre-Reinheitsgebot-Deutsches-Bier-was-darf-rein-und-was-ist-drin-4991639-0/
4. The brewing process · Cornell Brewing Program, Cornell University https://blogs.cornell.edu/brewing/?p=116
5. History of beer · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_beer
6. Mashing · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Mashing

Faits vérifiés le 2026-10-12

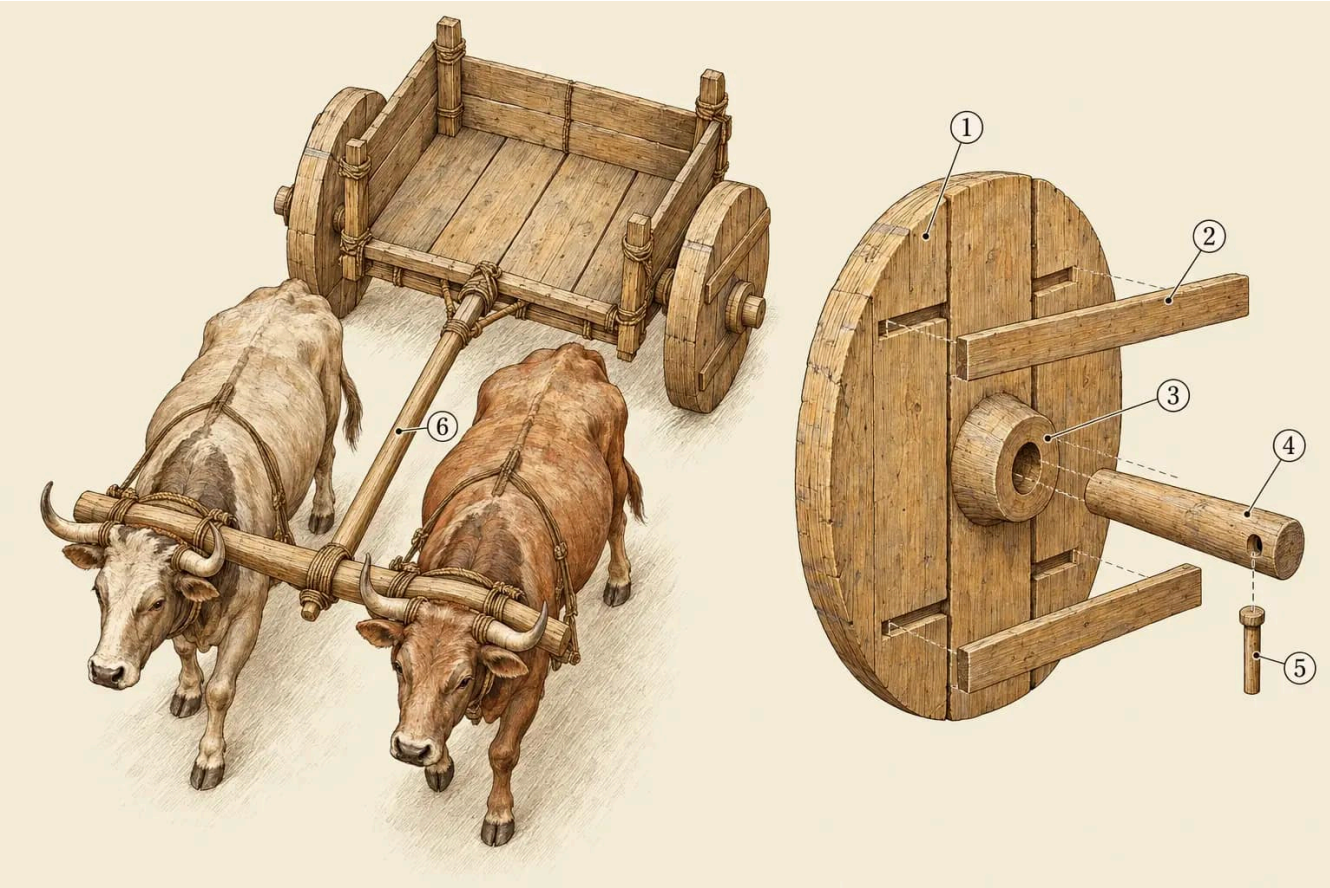
Roue & essieu

Rouler au lieu de traîner

v. 3 500 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5)

Mène à : Bicyclette (p. 255), Grue & poulie (p. 151), Rouet (p. 192), Locomotive à vapeur (p. 246), Roue hydraulique (p. 159)



1 Planches du disque 2 Traverse 3 Moyeu 4 Essieu 5 Esse (clavette) 6 Timon

Une roue qui tourne sur un essieu permet de faire rouler une charge au lieu de la traîner : le frottement se reporte sur un petit palier graissé. Les chariots à roues apparaissent en Mésopotamie et en Europe vers 3500 av. J.-C., et la même idée fera ensuite tourner treuils, moulins et roues à aubes.

Ce que c'est

Une roue et son essieu forment un disque fixé sur un axe, ou tournant autour de lui. Sous un chariot, l'ensemble porte une charge sur le sol. Sur un treuil de puits ou un cabestan, il démultiplie l'effort.

Des rouleaux glissés sous un traîneau doivent sans cesse être ramenés à l'avant, alors qu'une roue reste sous sa charge. Le plus long a été d'apprendre à la faire tourner sans à-coups autour d'un axe fixe.

La planche reconstitue une roue pleine ancienne faite de trois planches, un type trouvé dans de nombreuses fouilles en Europe et au Proche-Orient, sous un char à bœufs des environs de 3000 av. J.-C.

Comment ça marche

Un traîneau qu'on tire appuie de tout son poids sur ses patins et racle chaque bosse. Sur des roues, la charge ne frotte plus qu'entre l'essieu et son logement, et la jante roule sur le sol.

Sur des rouleaux, la charge avance sans peine, mais chaque rouleau resté derrière doit être rapporté à l'avant.

Le gain vient du bras de levier, car la surface de l'essieu est bien plus proche du centre que la jante. Sur une roue de 70 cm de diamètre montée sur un essieu de 7 cm, la jante dispose d'un bras de levier dix fois plus long : la traction nécessaire pour vaincre le frottement de l'essieu n'en vaut qu'un dixième environ. La jante doit encore rouler sur le sol, ce qui ajoute sa propre résistance sur un chemin mou ou caillouteux. La graisse, souvent du suif ou du goudron, réduit encore le frottement de l'essieu.

Un essieu trop mince casse, un essieu trop gros frotte davantage. Le trou doit être rond et lisse, l'essieu bien ajusté sans forcer. Sur certains des premiers chars, les roues étaient bloquées sur les extrémités carrées de l'essieu et tournaient avec lui, sa partie centrale arrondie tournant dans des supports sous la caisse. La plupart des voitures plus tardives ont un essieu fixe : les roues tournent sur ses extrémités, retenues par des esses.

Comment la construire

Une roue pleine pour une charrette à bras légère se fabrique avec des outils à main. Voici les grandes étapes, sans plan coté ; une voiture pour de lourdes charges ou un attelage demande l'expérience d'un charron.

Choisir le bois. Prenez un bois dur, tenace et bien sec : chêne, frêne ou orme. Il faut trois planches d'environ 5 cm d'épaisseur, celle du milieu plus large que les deux autres.

Tailler le disque. Posez les planches bord à bord et tracez un cercle avec une cordelette et un piquet. Creusez des rainures en travers du fil et enfoncez-y deux traverses de bois dur qui verrouillent l'assemblage, avec des chevilles entre les planches. Sciez ensuite le contour.

Faire le moyeu. Pour que la roue ne voile pas, épaississez le centre en fixant un bloc tourné, le moyeu, sur chaque face avec des chevilles de bois dur collées qui traversent tout le disque. Percez le trou de l'essieu bien perpendiculaire au disque, puis lissez-le à la râpe ou avec une tige de fer chauffée.

Façonner l'essieu. Équarrissez une pièce de bois dur droite et sans nœuds. Amincissez les bouts pour qu'ils entrent dans les moyeux avec un léger jeu, et percez chaque extrémité, juste au-delà de la place du moyeu et de la rondelle, pour l'esse. Boulonnez l'essieu sous le plateau avec des cales de bois ou des brides de fer.

Monter et essayer. Graissez les fusées, enfilez les roues, ajoutez une rondelle et enfoncez les esses. Chaque roue doit tourner librement et rond. Chargez la charrette peu à peu et vérifiez les assemblages après chaque essai.

> **Sécurité.** Herminettes, haches et tarières font des entailles profondes : gardez les deux mains derrière le tranchant. Une charrette chargée peut dévaler une pente et écraser qui se trouve devant : essayez-la sur terrain plat et calez les roues à l'arrêt. Si vous brûlez le trou de l'essieu au fer rouge, gardez de l'eau à portée de main.

Histoire et évolution

Entre 3600 et 3300 av. J.-C. environ, des traces de la roue apparaissent sur une vaste région. Les tablettes d'argile d'Uruk, en Mésopotamie, emploient un signe pour le chariot. Un vase de Bronocice, dans le sud de la Pologne, porte le dessin de ce qui ressemble à une voiture à quatre roues. D'autres découvertes viennent du nord du Caucase et des steppes au nord de la mer Noire. Les archéologues discutent encore du lieu où l'idée est née.

Une roue de char de l'âge du bronze : six rayons et une jante en segments cintrés, bien plus légère qu'un disque plein.

La plus ancienne roue conservée a été trouvée en 2002 dans les marais de Ljubljana, en Slovénie. Elle mesure environ 70 cm de diamètre ; ses planches de frêne sont tenues par des traverses de chêne, et la datation au radiocarbone la place entre 3350 et 3100 av. J.-C. environ. Son essieu de chêne, long d'environ 1,2 m, a des extrémités carrées qui se bloquaient dans la roue.

L'anthropologue David Anthony estime que la roue est arrivée tard faute d'outils. Percer des trous ronds et dresser des essieux justes demandait des ciseaux et des gouges en cuivre coulé, courants au Proche-Orient seulement après 4000 av. J.-C. environ.

Les roues pleines étaient robustes mais lourdes, adaptées à de lents chars à bœufs. Vers 2000 av. J.-C., les gens de la culture de Sintashta, à l'est de l'Oural, fabriquent des roues légères à rayons pour des chars à deux roues tirés par des chevaux. La roue à rayons et le char gagnent l'Égypte, la Grèce et la Chine dans les siècles suivants.

Le cerclage : posé chaud, le bandage de fer se resserre en refroidissant.

Au Ier millénaire av. J.-C., les charrons celtes commencent à cercler la jante d'un bandage de fer d'une seule pièce, posé chaud pour qu'il rétrécisse et serre les assemblages, une méthode employée jusqu'au XXe siècle.

Le XIXe siècle apporte la roue à rayons métalliques tendus, assez légère pour la bicyclette, puis le pneu gonflé d'air. Un essieu ferroviaire fonctionne toujours ainsi : la charge repose sur un petit palier lubrifié pendant que la roue roule sur le rail.

Chiffres clés

Plus ancienne roue conservée
Marais de Ljubljana, Slovénie, v. 3150 av. J.-C.

Premières images de chariots
v. 3500–3350 av. J.-C. (tablettes d'Uruk, vase de Bronocice)

Roue à rayons
v. 2000 av. J.-C., steppes à l'est de l'Oural

Frottement de l'essieu ressenti à la jante
Réduit du rapport entre diamètre de la roue et diamètre de l'essieu

Sources

1. Wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Wheel
2. World's oldest wheel found in Slovenia · Government Communication Office of Slovenia https://slovenia.si/art-and-cultural-heritage/worlds-oldest-wheel-found-in-slovenia
3. Replica of the oldest wooden wheel with an axle · City Museum of Ljubljana (MGML) https://mgml.si/en/city-museum/news/667/replica-of-the-oldest-wooden-wheel-with-an-axle-for-the-winner-of-the-26th-tour-of-slovenia/
4. Why It Took So Long to Invent the Wheel · Scientific American https://www.scientificamerican.com/article/why-it-took-so-long-to-inv/
5. Sennacherib's Quarry, 705–681 BCE · Center for Online Judaic Studies https://cojs.org/sennacherib-s_quarry-_705-681_bce/
6. Old Civilization: Layard's Nineveh (1853) · Scientific American https://www.scientificamerican.com/article/old-civilizationlayards-nineveh/
7. Estimating Wagon Draft (TechGuide 2G-213) · Tillers International https://tillersinternational.org/wp-content/uploads/2025/01/EstimatingWagonDraftTechGuide.pdf
8. Friction and Friction Coefficients for various Materials · Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
9. Densities of Solids · Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html

Faits vérifiés le 2026-10-11

Écriture

Le savoir qui survit à la mémoire

v. 3 300 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Céramique (p. 23), Outils de pierre (p. 5)

Mène à : Numération de position (p. 99), Presse à imprimer (p. 207), Télégraphe électrique (p. 288)

1 Jetons de comptage en argile 2 Enveloppe d'argile ouverte, jetons à l'intérieur 3 Tablette archaïque : chiffres, orge et jarre
4 Calame en roseau taillé 5 Palette de scribe, encres noire et rouge 6 Rouleau de papyrus

L'écriture fixe la langue par des marques visibles qu'une autre personne peut relire plus tard, au loin ou longtemps après la mort de celui qui a écrit. Elle est apparue plusieurs fois de façon indépendante ; parmi les plus anciens témoins figurent des tablettes du sud de la Mésopotamie, vers 3300 av. J.-C., où les comptables des temples imprimaient et traçaient des signes tant que l'argile était humide.

Ce que c'est

L'écriture est un ensemble de marques visibles, convenues au sein d'une communauté, qui représentent les mots ou les sons d'une langue. Un lecteur qui n'a jamais rencontré l'auteur peut retrouver le message, même des siècles plus tard.

On tenait des comptes bien avant d'écrire. Au Proche-Orient, de petits jetons d'argile en forme de cônes, de billes ou de disques apparaissent vers 8000 av. J.-C. L'archéologue Denise Schmandt-Besserat y voit des pions représentant des quantités de grain, d'huile ou de bétail ; d'autres, comme Lucy Bennison-Chapman, estiment que

beaucoup servaient à autre chose. Vers 3500 av. J.-C., les comptables enfermaient les jetons dans des boules d'argile creuses et en imprimaient les formes à l'extérieur. Ces objets suivaient des quantités, mais ne pouvaient noter ni un nom ni une phrase.

Une écriture peut noter des mots entiers, des syllabes ou des sons isolés, et beaucoup combinent ces principes.

Chaque forme de jeton désignait sans doute un type de marchandise. Enfermés dans une enveloppe d'argile, les jetons pouvaient garder la trace d'une dette jusqu'à son paiement.

Comment ça marche

Deux idées ont fait passer du compte à l'écriture. La première donne des signes distincts à la quantité et à la marchandise. Sur les plus anciennes tablettes d'Uruk, les nombres sont imprimés avec le bout rond d'un calame et les biens sont dessinés à côté avec une pointe : cinq encoches et un épi d'orge pour cinq mesures d'orge. La valeur d'un signe de nombre dépendait encore de ce qu'on comptait, avec des systèmes différents pour le grain, le bétail ou les terres.

La seconde est le rébus : employer un signe pour son son. En sumérien, « flèche » et « vie » se prononçaient de la même façon, si bien que le signe de la flèche pouvait aussi écrire « vie », un mot difficile à dessiner. Des signes phonétiques apparaissent en Mésopotamie vers 3000 av. J.-C.

Selon son inclinaison, l'arête d'un roseau taillé laisse des coins verticaux, horizontaux ou obliques.

Tracer des courbes dans l'argile humide la soulève en bourrelets ; les scribes ont donc pris l'habitude d'enfoncer l'arête d'un roseau taillé. Chaque pression laissait un coin, et au cours du IIIe millénaire av. J.-C. les dessins sont devenus des groupes de coins, d'où le nom de cunéiforme, du latin *cuneus*.

Les scribes égyptiens mâchaient le bout d'une tige de jonc pour en faire un pinceau, qu'ils frottaient sur des pastilles d'encre noire ou rouge logées dans une palette en bois. Ils écrivaient sur du papyrus, des lamelles de moelle de la plante posées en deux couches croisées, pressées puis séchées. Les alphabets, plus tard, ont noté des sons isolés : quelques dizaines de signes suffisent alors pour écrire n'importe quel mot.

Comment le fabriquer

Il faut de l'argile fine, de l'eau, un roseau sec ou une baguette de bambou de la grosseur d'un crayon, un couteau et un linge humide.

Préparer l'argile. L'argile de potier s'emploie telle quelle. Celle d'une berge doit tremper, passer à travers un linge pour retirer le sable grossier, puis raffermir jusqu'à garder l'empreinte du pouce sans coller. Pétrissez-la pour chasser les bulles d'air.

Former la tablette. Écrasez une boule de la taille d'un petit œuf en un coussin d'environ 2 cm d'épaisseur, assez petit pour tenir dans une main.

Tailler le calame. Sciez environ 15 cm de roseau. Près d'un bout, amincissez les côtés au couteau jusqu'à obtenir une pointe de section carrée, aux faces planes et aux arêtes vives, puis coupez-la net : un angle enfoncé dans l'argile laisse un coin. Coupez l'autre bout à travers un nœud, pour que la cloison pleine ferme le tube, et arrondissez-le ; une baguette de bois ronde convient aussi. Enfoncé droit, il laisse un cercle ; incliné, une encoche en forme de D, les deux formes des premiers chiffres.

Écrire. Partagez la face en cases avec le long côté du calame et placez une entrée par case. Imprimez le nombre avec le bout rond et relevez-le sans traîner. Dessinez ensuite le signe de ce qui est compté avec un angle du bout carré, comme les premiers scribes, ou composez-le de coins imprimés, comme leurs successeurs.

Faire sécher. Laissez la tablette plusieurs jours à l'ombre, en la retournant une fois pour qu'elle ne se fende pas. L'argile sèche se ramollit dans l'eau ; une cuisson au four, comme pour la poterie, la rend durable.

Essayer l'alphabet. Dites dix mots à voix haute et notez les sons que vous entendez, sans penser aux lettres de leur orthographe. Donnez à chaque son un signe simple, selon le vieux procédé : dessinez une chose dont le nom commence par ce son. Si aucun mot ne commence par un son, inventez-lui un signe. Ajoutez un signe dès qu'un mot apporte un son nouveau : la plupart des alphabets comptent de vingt à une quarantaine de lettres.

> **Sécurité.** Taillez le roseau en éloignant la lame de votre corps. Ne poncez pas et ne balayez pas l'argile sèche : sa poussière contient de la silice fine, nocive pour les poumons ; nettoyez avec un linge humide. Ne cuisez les tablettes que dans un vrai four de potier, et jamais une pièce encore humide, qui peut éclater.

Histoire et évolution

Les plus anciennes tablettes viennent du niveau Uruk IV du quartier des temples d'Uruk, daté en général de 3350–3200 av. J.-C. environ, de 3200–3100 selon certains auteurs. On connaît plus de 6 000 tablettes et fragments proto-cunéiformes, d'Uruk et d'autres sites, surtout des comptes. Le cunéiforme a duré plus de trois mille ans.

En Égypte, des étiquettes en os et en ivoire de la tombe U-j d'Abydos, datées des environs de 3200 av. J.-C., portent déjà des hiéroglyphes, dont certains notent un son. Les spécialistes se demandent encore si l'Égypte a emprunté l'idée à la Mésopotamie. L'écriture chinoise apparaît sur les os oraculaires des Shang à Anyang vers 1200 av. J.-C., déjà mûre. En Mésoamérique, on écrivait dans l'Oaxaca vers 400 av. J.-C., et les glyphes mayas peints de San Bartolo datent de 300–200 av. J.-C. Aucun contact ne relie ces deux foyers au Proche-Orient à ces dates : ce sont des inventions distinctes.

En Chine, le scribe frottait un bâton d'encre sur une pierre mouillée et écrivait avec un pinceau de poils effilé.

L'alphabet est né des hiéroglyphes. Une quarantaine de courtes inscriptions des mines de turquoise de Serabit el-Khadim, dans le Sinaï, et deux du Ouadi el-Hol, en Égypte, n'emploient que 27 à 29 signes. Leurs auteurs parlaient une langue sémitique. Ils donnaient à chaque image égyptienne le premier son de son nom dans leur langue : la maison, *beth*, devenait b ; l'eau, *mem*, devenait m. Les datations proposées vont d'environ 1850 à 1550 av. J.-C. Vers 1200–1050 av. J.-C., les Phéniciens écrivaient 22 lettres consonnes de droite à gauche. Les Grecs les ont reprises vers 800 av. J.-C. en y ajoutant des voyelles, et les Étrusques ont transmis l'alphabet à Rome au VIIe siècle av. J.-C.

Le papier, fabriqué en Chine dès le IIe siècle av. J.-C., est devenu plus tard le support courant de l'écriture et des livres imprimés.

Chiffres clés

Plus anciennes tablettes
Uruk, sud de l'Irak, vers 3350–3200 av. J.-C. (3200–3100 selon certains auteurs)

Premier corpus
Plus de 6 000 tablettes et fragments proto-cunéiformes, surtout des comptes

Inventions distinctes
Mésopotamie, Chine et Mésoamérique ; Égypte probablement, mais c'est débattu

Premier alphabet
27 à 29 signes, Sinaï et Égypte, entre 1850 et 1550 av. J.-C. environ

Alphabet phénicien
22 lettres consonnes, vers 1200–1050 av. J.-C.

Sources

1. The state of decipherment of proto-Elamite (Englund, 2004) · Cuneiform Digital Library Initiative https://cdli.earth/files-up/publications/englund2004c.pdf
2. Seals and signs: tracing the origins of writing in ancient South-west Asia (Kelley, Cartolano & Ferrara, 2024) · Antiquity, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/seals-and-signs-tracing-the-origins-of-writing-in-ancient-southwest-asia/B3C2D400F3F80A7A0162D9035C9C2804
3. The Evolution of Writing (Schmandt-Besserat, 2014) · Denise Schmandt-Besserat, University of Texas at Austin https://sites.utexas.edu/dsb/tokens/the-evolution-of-writing/
4. Reconsidering 'Tokens': The Neolithic Origins of Accounting or Multifunctional, Utilitarian Tools? (Bennison-Chapman, 2019) · Cambridge Archaeological Journal, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/cambridge-archaeological-journal/article/abs/reconsidering-tokens-the-neolithic-origins-of-accounting-or-multifunctional-utilitarian-tools/7E6C04CB040AD8AA0EA84B94D4D275C4
5. Visible Language: Inventions of Writing in the Ancient Middle East and Beyond (Woods, ed., 2010) · Institute for the Study of Ancient Cultures, University of Chicago https://isac.uchicago.edu/sites/default/files/uploads/shared/docs/oimp32.pdf
6. Early Egyptian Writing (1999) · Archaeology, Archaeological Institute of America https://archive.archaeology.org/9903/newsbriefs/egypt.html
7. Oracle bone (50-31) · Nelson-Atkins Museum of Art https://art.nelson-atkins.org/objects/23289/oracle-bone
8. Evidence of Earliest Maya Writing (report on Saturno, Stuart & Beltrán, Science, 2006) · Mesoweb https://www.mesoweb.org/reports/SanBartoloWriting.html
9. Proto-Sinaitic: Progenitor of the Alphabet (Simons, 2011) · Rosetta 9, University of Birmingham https://rosetta.bham.ac.uk/wp-content/uploads/2024/02/Simons_Proto-Sinaitic_Rosetta9.pdf
10. The alphabet · Deutsche Nationalbibliothek, German Museum of Books and Writing https://mediengeschichte.dnb.de/DBSMZBN/Content/EN/SoundsSymbolsScript/01-alphabet-en.html
11. Papyrus · Centre for the Study of Manuscript Cultures, Universität Hamburg https://www.csmc.uni-hamburg.de/profiling-guide/materials/writing-surfaces/papyrus.html
12. Scribal Palette · Institute of Egyptian Art and Archaeology, University of Memphis https://memphis.edu/egypt/exhibit/palette.php
13. The Cuneiform Stylus (on Cammarosano, Mesopotamia 49, 2014) · Book and Sword https://www.bookandsword.com/2022/12/10/the-cuneiform-stylus/
14. What the Earliest Texts Say About the Invention of Writing · Discover Magazine https://www.discovermagazine.com/what-the-earliest-texts-say-about-the-invention-of-writing-692

Faits vérifiés le 2026-10-14

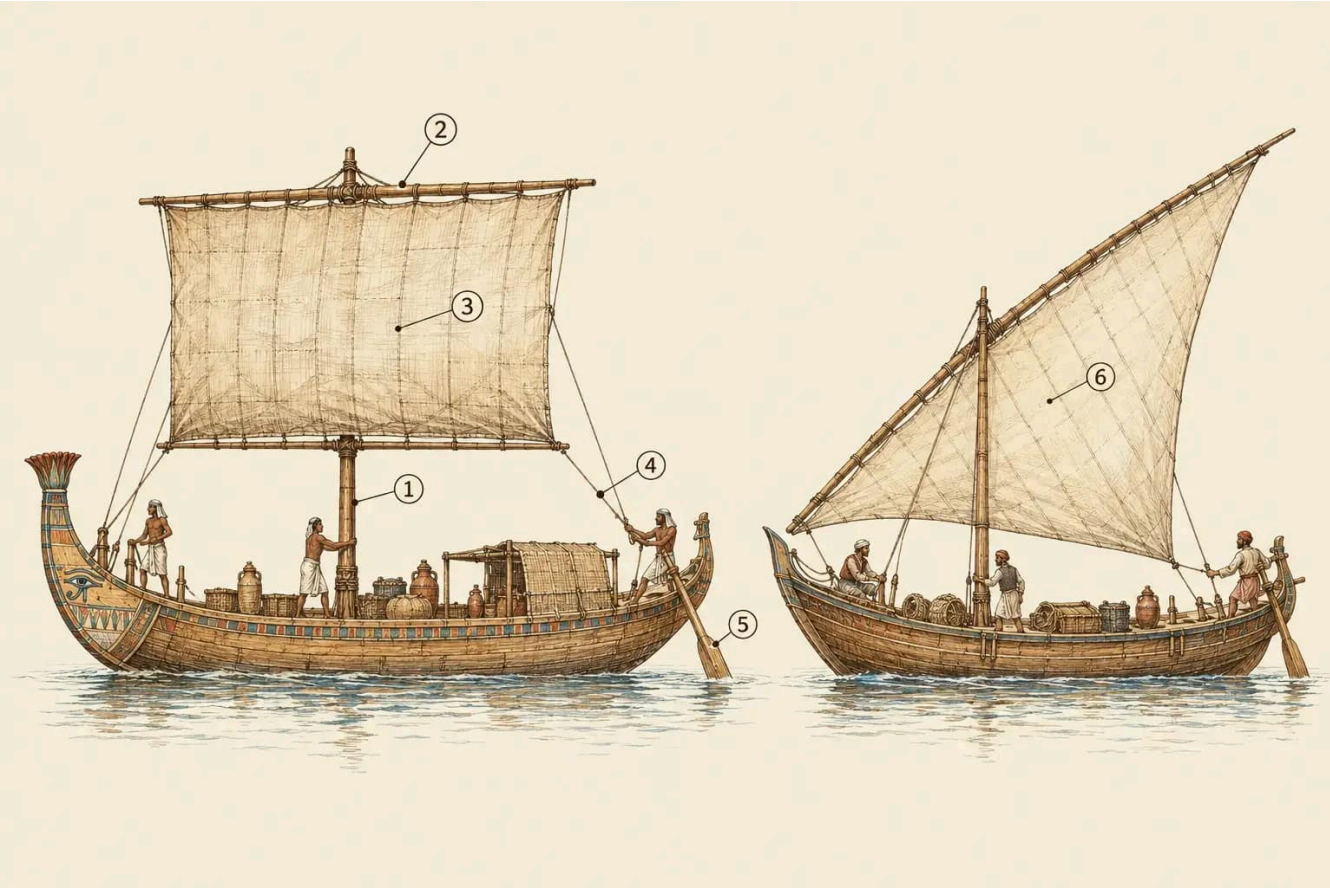
Voile

Prendre le vent pour avancer

v. 3 200 av. J.-C. · Préhistoire · Établissement

Nécessite : Corde & cordage (p. 13), Tissage (p. 44)

Mène à : Navigation astronomique (p. 212)



1 Mât 2 Vergue 3 Voile carrée 4 Écoute 5 Aviron de gouverne 6 Voile latine

Une voile est une surface de toile ou de natte hissée sur un mât pour prendre le vent et faire avancer un bateau. Bien orientée, elle le pousse vent arrière ou vent de travers, et, en louvoyant, jusque vers l'endroit d'où vient le vent.

Ce que c'est

Une voile est une surface tendue au vent pour faire avancer un navire. Les premières étaient sans doute des nattes ou des peaux dressées sur une perche ; on les a ensuite tissées en lin, en laine ou en coton, et aujourd'hui surtout en fibres synthétiques. Suspendue à un mât et réglée par des cordages, une voile fait avancer un bateau sans carburant ni rameurs.

La planche montre des voiles carrées et des voiles longitudinales. La voile carrée pend en travers du bateau sous une pièce de bois horizontale, la vergue, et fonctionne le mieux vent arrière. Une voile longitudinale se place dans l'axe du bateau. La voile latine est un triangle suspendu à une longue vergue oblique ; elle convient au vent de travers.

Comment ça marche

Vent arrière, le principe est simple : l'air pousse sur la voile comme sur une main ouverte. À cette allure, un bateau ne peut pas dépasser la vitesse du vent, car plus il va vite, plus le vent qu'il ressent faiblit.

Vent de travers, la voile fonctionne comme une aile. Creusée et présentée au vent sous un petit angle, elle dévie l'écoulement de l'air, et l'air la repousse, surtout de côté, un peu vers l'avant. La coque, et la quille s'il y en a une, résistent à la dérive parce que l'eau appuie sur elles, et il reste une poussée vers l'avant. C'est pourquoi un bateau peut aller plus vite vent de travers que vent arrière.

Aucune voile ne fait remonter un bateau droit dans le vent. Un voilier moderne tient un cap d'environ 40 à 45 degrés par rapport au vent. Pour atteindre un point situé au vent, il trace des zigzags en changeant d'amure à chaque fois : c'est louvoyer.

L'équipage règle la voile avec des cordages. L'écoute (4) borde ou choque un coin inférieur de la voile pour régler son angle au vent. La drisse hisse la vergue (2) le long du mât (1). Sur un gréement carré, les bras font pivoter la vergue. Par vent fort, on diminue la surface de toile : on prend des ris. L'aviron de gouverne (5), plus tard le gouvernail, tient le cap.

Comment la fabriquer

Ces grandes lignes décrivent la fabrication d'une petite voile carrée. Ce n'est ni un plan coté ni un projet permettant de gréer n'importe quelle embarcation. Utiliser un gréement conçu pour le bateau concerné et vérifié par un constructeur naval qualifié ou un moniteur de voile : équilibre entre coque, voile et gouverne, stabilité et résistance des fixations.

Réunir le matériel. Utiliser la toile, le fil, la ralingue, la vergue et les pièces de fixation prévus par le plan vérifié. Il faut aussi une aiguille à voile et une paumelle. L'emplanture du mât et ses fixations doivent respecter ce plan.

Couper et assembler les laizes. Poser les bandes de toile côte à côte. Respecter le recouvrement et les points de couture prévus par le plan pour les efforts attendus.

Ourler et ralinguer. Replier et coudre les ourlets selon le plan, puis y coudre la ralingue. La toile et les coutures transmettent les efforts du vent ; la ralingue renforce les bords. Renforcer les coins et poser les anneaux ou œillets prévus.

La paumelle permet de pousser une grosse aiguille à travers plusieurs épaisseurs de toile.

Gréer. Suivre le plan vérifié pour fixer la voile à la vergue et installer la drisse et les écoutes. Vérifier que la vergue peut être affalée et que les cordages coulissent librement.

S'exercer avant de naviguer. Faire montrer par un moniteur comment affaler la voile et réduire sa traction avec ce gréement, puis s'exercer sous sa surveillance avant de prendre l'eau. Larguer les écoutes peut laisser une voile carrée porter. Faire le premier essai sur un plan d'eau abrité, par vent faible, avec un moniteur à bord.

> **Sécurité.** Une rafale peut chavirer une petite embarcation en quelques secondes. Porter un gilet de sauvetage, consulter la météo et naviguer d'abord par vent faible, près du bord, sous la surveillance de quelqu'un. Ne jamais tourner l'écoute de manière à ne plus pouvoir la larguer vite. Une vergue ou une bôme qui balaie peut frapper la tête, et l'eau froide épuise vite un nageur.

Histoire et évolutions

Le bateau est bien plus ancien que la voile : on a pagayé, perché et ramé longtemps avant d'utiliser le vent. On ne sait pas quand la voile est apparue, car toiles et nattes se conservent rarement. Au Koweït, des restes de bateaux de mer en roseaux enduits de bitume datent de 5500 à 5000 av. J.-C. Robert Carter les étudie comme des témoins d'échanges maritimes anciens ; ces vestiges seuls ne prouvent pas l'emploi de voiles.

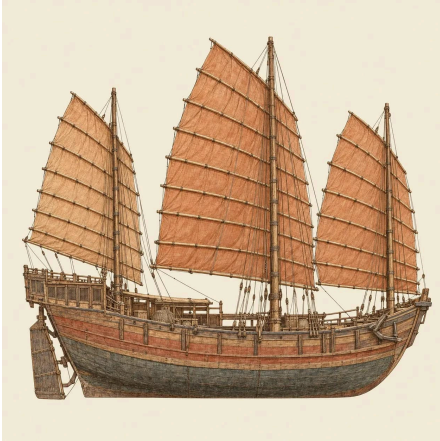
Tendue entre deux espars, la voile en pince de crabe a mené les pirogues austronésiennes à travers le Pacifique.

Des représentations possibles viennent d'Égypte, vers 3200 av. J.-C. Une jarre peinte de la période de Nagada II, au British Museum, montre un bateau portant un objet sur une perche. R. L. Bowen y voyait une voile ; l'autre interprétation est celle d'une bannière. La date du catalogue, vers 3200 av. J.-C., renvoie à cet indice possible et ne date pas l'invention. Sur le Nil, le courant portait les bateaux vers le nord et le vent pouvait les ramener vers le sud.

Les navires égyptiens, phéniciens, grecs et romains portaient des voiles carrées, puis les bateaux vikings, dont les voiles étaient souvent tissées en laine. Dans le Pacifique et l'océan Indien, les marins austronésiens ont mis au point leurs propres gréements. Le mot « voile » remonte dans leurs langues à environ cinq mille ans, et la voile en pince de crabe a porté leurs pirogues à balancier sur des milliers de kilomètres de haute mer.

La voile latine apparaît en Méditerranée dès le IIe siècle apr. J.-C. et se généralise à partir du Ve. Elle coûtait moins cher à fabriquer et à entretenir que la voile carrée, sans être nettement plus rapide. Les anciennes images de navires chinois montrent des voiles carrées. La Chine aurait adopté la voile lattée de jonque, raidie par des lattes de bambou, vers le XIIe siècle ; cela ne prouve pas un remplacement général des voiles carrées.

À partir du XVe siècle, les constructeurs européens associent voiles carrées et latines sur les caraques et certaines caravelles. Ces traditions contribuent aux gréements des voiliers océaniques ultérieurs. La vapeur supplante la voile dans le commerce aux XIXe et XXe siècles. La voile survit en plaisance et en course, taillée dans des tissus synthétiques.



Les lattes de bambou gardent la voile de jonque plate et rigide.

Chiffres clés

Premières représentations possibles
Égypte, vers 3200 av. J.-C.

Cap le plus près du vent
Environ 40 à 45° pour un voilier moderne

Voile latine
En Méditerranée dès le IIe siècle apr. J.-C.

Voile lattée de jonque
Peut-être adoptée en Chine vers le XIIe siècle apr. J.-C.

Sources

1. Sail · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sail
2. Junk (ship) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Junk_(ship)
3. Boat remains and maritime trade in the Persian Gulf during the sixth and fifth millennia BC (R. Carter, 2006) · Antiquity https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/abs/boat-remains-and-maritime-trade-in-the-persian-gulf-during-the-sixth-and-fifth-millennia-bc/98224B03E778DE5C9D3EAA806A5ABCF8
4. Egypt's Earliest Sailing Ships (R. L. Bowen, 1960) · Antiquity https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/egypts-earliest-sailing-ships/28F7218895B44D2DC9BF36AECD5B3F79
5. The physics of sailing (J. Wolfe) · School of Physics, UNSW Sydney https://newt.phys.unsw.edu.au/~jw/sailing.html
6. The Ship’s Sail · The Viking Ship Museum https://www.vikingeskibsmuseet.dk/en/professions/education/all-about-the-viking-ship/the-ships-sail
7. Seam · UK Sailmakers https://www.uksailmakers.com/encyclopedia/glossary/seam/
8. Carrack (Não) · The Mariners’ Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/watercraft/carrack-nao/
9. Hypothetical Reconstruction of an Ancient Egyptian Sea-going Vessel from the Reign of Hatshepsut, 1500 BCE (P. Couser, C. Ward and T. Vosmer, 2009) · RINA Historic Ships conference https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Navires/Min%20of%20the%20Desert/Min-Couser2012.pdf
10. Drag Equation · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/

Faits vérifiés le 2026-10-12

Savon

Graisse et cendre contre les germes

v. 2 800 av. J.-C. · Antiquité · Établissement

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9), Céramique (p. 23)

Mène à : Hygiène et antisepsie (p. 301)

1 Cuvier à cendres (tonneau à lessive) 2 Pot recueillant la lessive 3 Suif 4 Chaudron à savon sur le feu 5 Moule et pains découpés

Le savon s'obtient en faisant bouillir ou en mélangeant une graisse avec un alcali fort, qui scinde la graisse en glycérol et en sels d'acides gras capables d'entraîner graisse et saleté dans l'eau. Des recettes de produits lavants proches du savon remontent à la Mésopotamie du IIIe millénaire av. J.-C. ; l'alcali industriel bon marché en a fait un produit courant au XIXe siècle.

Ce que c’est

Le savon est un produit lavant fabriqué à partir de graisses ou d’huiles et d’un alcali. Chaque molécule de savon possède une extrémité qui s’accroche à l’eau et une longue queue qui s’accroche aux corps gras : elle peut ainsi emporter graisse, saleté et bien des microbes de la peau vers l’eau de rinçage. Fait avec de l’hydroxyde de sodium, le savon durcit en pains ; les savons de potassium restent mous ou liquides. La lessive que l’on tirait de la cendre de bois contenait du carbonate de potassium, et non un hydroxyde moderne, et donnait un savon mou.

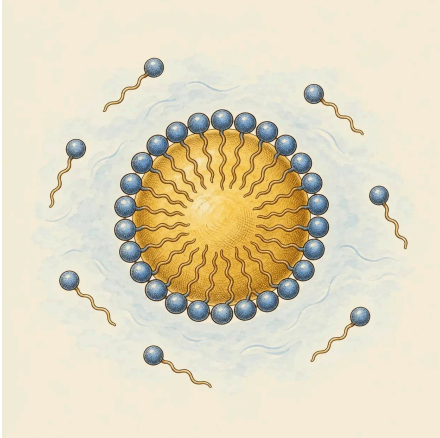
La planche montre la fabrication du savon telle qu’on la pratiquait dans les fermes d’Europe et d’Amérique du Nord jusqu’au XIXe siècle : l’eau versée sur la cendre pour faire la lessive, un pot pour la recueillir, le suif fondu, le

chaudron qui bout sur le feu, et un moule avec des pains découpés qui sèchent.

Comment ça marche

Graisses et huiles sont des triglycérides : trois chaînes d'acides gras liées à une molécule de glycérol. Un alcali fort rompt ces liaisons. Chaque acide gras prend le sodium ou le potassium de l'alcali et devient une molécule de savon, tandis que le glycérol est libéré. Les chimistes appellent cette réaction la saponification.

Dans l'eau, les molécules de savon se regroupent en minuscules sphères, les micelles, queues grasses à l'intérieur et têtes hydrophiles à l'extérieur. Une goutte de graisse est attirée au cœur et part avec elles au rinçage. Ces mêmes queues peuvent s'insérer dans l'enveloppe grasse de certaines bactéries et de certains virus, dont les coronavirus, et la disloquer. C'est pourquoi se laver au savon et à l'eau élimine bien plus de germes que l'eau seule, même si les microbes à paroi plus résistante s'en défendent mieux.



Une micelle : les queues grasses du savon retiennent la graisse à l'intérieur, et leurs têtes, attirées par l'eau, la laissent partir au rinçage.

À la ferme, l'alcali venait de la cendre. L'eau versée sur un tonneau de cendre de bois dur dissolvait des sels de potassium, surtout du carbonate de potassium, et ressortait en lessive brune. Bouillie six à huit heures avec du suif, elle donnait un savon mou et gélatineux, que l'on gardait dans un tonneau et puisait à la louche. Du sel ajouté en fin de cuisson faisait remonter un savon plus ferme, en pain qu'on pouvait découper, mais le sel coûtait cher et bien des familles s'en passaient. Un vrai savon dur à la soude demandait de la soude, tirée des cendres d'algues et de plantes du littoral jusqu'à ce que Nicolas Leblanc trouve le moyen de la fabriquer à partir du sel.

Comment le faire

On fabrique aujourd'hui de petites quantités de savon à froid, avec de la soude caustique vendue pour la savonnerie et un calculateur de saponification. La soude caustique est corrosive et peut rendre aveugle en quelques secondes : c'est un travail réservé aux adultes, dans une pièce calme et dégagée.

Réunir le matériel. Il faut des lunettes de protection, des gants résistant aux produits chimiques et des manches longues, une balance électronique au gramme près, des récipients en inox ou en polypropylène vendus comme résistant à la soude chaude (jamais en aluminium, qui réagit avec elle), un mixeur plongeant, un thermomètre, un moule en silicone ou chemisé, et de l'huile d'olive pure ou un mélange d'huiles éprouvé.

Calculer. Entrez le poids exact de chaque huile dans un calculateur de saponification, avec un surgraissage d'environ 5 %. Pour 500 g d'huile d'olive, il donne environ 64 g de soude caustique et environ 170 g d'eau. Vérifiez deux fois : trop d'alcali donne un savon qui brûle la peau.

Préparer la solution de soude. Dehors ou près d'une fenêtre ouverte, pesez d'abord l'eau, puis versez lentement la soude dans l'eau en remuant, jamais l'eau sur la soude. La solution chauffe vite et dégage un instant des vapeurs : ne les respirez pas. Laissez-la refroidir vers 40 °C.

Mélanger et couler. Tiédissez l'huile à une température voisine, versez la solution et mixez par petites impulsions jusqu'à ce que le mélange épaississe comme une crème anglaise légère. Coulez-le dans le moule, couvrez et laissez reposer un à deux jours.

Laisser mûrir. Démoulez au bout d'un à deux jours et coupez en pains. Une recette bien calculée a fini de réagir à ce stade ; les quatre à six semaines de cure, debout dans un endroit sec et aéré, davantage pour un savon d'huile d'olive pure, laissent l'eau s'évaporer pour que les pains durcissent et durent. La cure ne rattrape pas un savon trop riche en soude : si un pain mûri pique encore la peau, jetez tout le lot.

> **Sécurité.** Portez toujours lunettes et gants pour manipuler la soude ou le savon frais, et tenez enfants et animaux hors de la pièce. Si la soude touche la peau, rincez aussitôt à grande eau ; si elle atteint les yeux, rincez à l'eau courante au moins 30 minutes pendant que quelqu'un appelle les secours. Étiquetez chaque récipient, rangez la soude caustique sous clé dans son emballage d'origine, et ne réutilisez jamais pour les aliments un ustensile qui a contenu de la soude. Manipulez le savon frais avec des gants les premiers jours.

Histoire et évolution

Avant que le savon soit courant, on écrasait la saponaire dans l'eau pour obtenir une mousse douce qui lavait la laine et le lin.

Les produits lavants proches du savon sont anciens, mais les premières preuves sont minces. On cite souvent des sources babyloniennes d'environ 2800 av. J.-C. comme la plus ancienne mention, et des récits plus tardifs décrivent des recettes mésopotamiennes du IIIe millénaire av. J.-C. qui chauffaient de l'huile avec de la cendre de bois pour laver la laine, même si les tablettes elles-mêmes sont rarement identifiées. Le papyrus égyptien Ebers, vers 1550 av. J.-C., prescrit des graisses animales ou des huiles végétales mêlées à un sel alcalin comme remède.

Les auteurs romains voyaient dans le savon un produit étranger. Pline l'Ancien, au Ier siècle de notre ère, l'attribue aux Gaulois, qui le faisaient de suif et de cendre et s'en servaient pour teinter leurs cheveux ; c'est chez lui qu'apparaît pour la première fois le mot latin sapo. Un siècle plus tard, le médecin Galien décrit le savon à la lessive et conseille de se laver avec.

Les savons durs à l'huile d'olive viennent de la Méditerranée orientale. Le médecin persan al-Razi consigne des recettes de savon vers 900, et au XIIIe siècle la savonnerie est un grand commerce dans les villes de Syrie et de Palestine. En Europe, les ateliers de Castille et de Marseille produisent du savon à l'huile d'olive en grande quantité dès le XVe siècle, tandis que les savonniers du Nord font bouillir du suif avec de la lessive de cendre.

Le savon d'Alep, à l'huile d'olive et de laurier, est coupé en cubes et empilé en tours aérées pour mûrir pendant des mois.

Le savon n'est devenu bon marché qu'avec son alcali. En 1791, Nicolas Leblanc fait breveter un procédé qui tire la soude du sel, de l'acide sulfurique, du charbon et du calcaire, si bien que les savonniers ne dépendent plus des cendres végétales. En 1823, Michel-Eugène Chevreul montre que les graisses sont des composés de glycérol et d'acides gras, ce qui explique ce qui se passe dans le chaudron. Des usines comme celle de Lever Brothers, fondée en 1885 à Warrington, vendent le savon en pains emballés et marqués. L'hygiène suit lentement : en 1847, Ignace Semmelweis impose au personnel de sa maternité viennoise de se désinfecter les mains au chlorure de chaux, et la mortalité par fièvre puerpérale y tombe d'environ 18 % à environ 1 % l'année suivante.

Chiffres clés

Plus ancienne mention d'un produit proche du savon
Babylone, vers 2800 av. J.-C.

La réaction
Graisse + alcali → savon + glycérol (saponification)

Chimie expliquée
Michel-Eugène Chevreul, 1823

Soude tirée du sel marin
Procédé de Nicolas Leblanc, 1791

Sources

1. Why soap works · Yale School of Medicine https://medicine.yale.edu/news-article/why-soap-works
2. Soap making (Dallas Bogan, History of Campbell County, Tennessee) · TNGenWeb https://www.tngenweb.org/campbell/hist-bogan/SoapMaking.html
3. Nicolas Leblanc (1742-1806) · European Route of Industrial Heritage https://www.erih.net/how-it-started/stories-about-people-biographies/biography/leblanc
4. Chevreul et la chimie des corps gras · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/chevreul-et-la-chimie-des-corps-gras/
5. Lever Brothers Limited · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp42536
6. Pioneering hand hygiene: Ignaz Semmelweis and the fight against puerperal fever (Cureus, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11568873/
7. Codex Standard for Named Animal Fats (CODEX-STAN 211-1999) · FAO/WHO Codex Alimentarius https://www.fao.org/4/y2774e/y2774e05.htm
8. Saponification value of fats and oils as determined from 1H-NMR data: the case of dairy fats (Foods, 2022) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9140812/
9. Soap · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Soap

Faits vérifiés le 2026-10-12

Numération de position

Des chiffres qui valent par leur place

v. 2 050 av. J.-C. · Antiquité · Établissement

Nécessite : Écriture (p. 87)

Mène à : Navigation astronomique (p. 212), Ordinateur (p. 368), Thermomètre et baromètre (p. 224)

1 Abaque à jetons : une ligne par puissance de dix 2 Caillou servant de jeton
3 Tablette d'argile : mille, soit 16 soixantaines et 40, en base soixante 4 Points et barres mayas : 2 et 10, en base vingt
5 Coquillage du zéro maya 6 Mille en chiffres indiens, ceux que nous employons

Dans une numération de position, quelques chiffres suffisent à écrire n'importe quel nombre, car la valeur de chacun dépend de la place qu'il occupe. Avec un zéro pour marquer une place vide, additions, multiplications et divisions se posent par écrit, colonne par colonne, sans abaque.

Ce que c’est

Dans 707, le premier 7 compte des centaines, le dernier des unités. Toute la numération de position tient là : un petit jeu de signes dont la valeur dépend de l’endroit où on les place. Les dix chiffres de 0 à 9 suffisent à écrire tout nombre entier, aussi grand soit-il.

Les systèmes plus anciens additionnaient leurs signes. Les scribes égyptiens avaient un signe pour l’unité, un autre pour la dizaine, un autre pour la centaine, et répétaient chacun autant de fois qu’il le fallait. En chiffres romains, 1888 s’écrit MDCCCLXXXVIII, treize signes. Ces nombres conviennent pour noter un total, mais on calcule

mal avec eux. Les comptables romains puis médiévaux travaillaient donc sur un abaque et n'écrivaient que le résultat.

La numération de position fait du nombre écrit un abaque sur le papier : le calcul lui-même peut être noté, puis vérifié. Le zéro le permet : d'abord simple marque d'une place vide, il est ensuite devenu un nombre.

Comment ça marche

La base est le nombre de chiffres différents, et chaque place vaut autant de fois la place située à sa droite. En base dix, 2748 signifie 2 milliers, 7 centaines, 4 dizaines et 8 unités. Dans 1081, le zéro indique qu'il n'y a pas de centaine ; sans lui, 1081 et 181 se confondraient.

Un nombre babylonien s'imprimait dans l'argile humide, un coin après l'autre.

Les autres bases suivent la même règle. Les scribes babyloniens comptaient par soixante avec deux marques, le clou vertical pour un et le chevron pour dix. Mille vaut 16 soixantaines et 40 : on écrit 16, puis 40. Les Mayas comptaient par vingt, avec un point pour un, une barre pour cinq et un coquillage pour zéro, et empilaient les places de bas en haut. Mille, c'est deux fois quatre cents, dix vingtaines et aucune unité : deux points sur deux barres sur un coquillage. Pour les dates du calendrier, la troisième place comptait 360 jours au lieu de 400. Les ordinateurs travaillent en base deux, où 13 s'écrit 1101 : un huit, un quatre, pas de deux et une unité.

Quand une colonne atteint dix ou plus, on écrit ses unités et l'on reporte ses dizaines sur la colonne suivante ; quand elle ne suffit pas, on emprunte un à gauche. Décaler un nombre d'une place vers la gauche le multiplie par dix, si bien que 47 × 23 vaut 47 × 3 plus 47 × 20 : 141 + 940 = 1081. La table de multiplication jusqu'à 9 × 9 suffit pour multiplier deux nombres quelconques. La division posée avance de gauche à droite, une place à la fois : on cherche un chiffre du quotient, on multiplie, on soustrait, on abaisse le chiffre suivant.

Comment le construire

Il faut une planche plate ou un carré de sable lisse, une craie ou un bâton, une quarantaine de cailloux, du papier et un crayon.

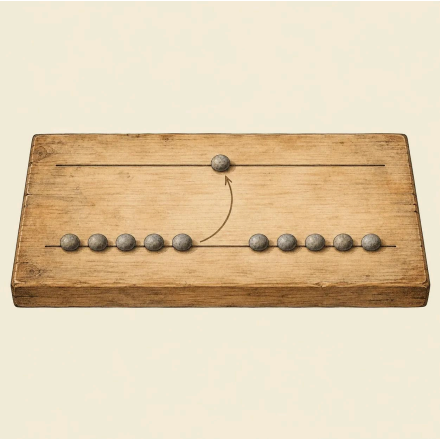
Tracer l'abaque. Tracez quatre lignes parallèles espacées d'une largeur de main : en partant du bas, les unités, les dizaines, les centaines et les milliers. Une fois les retenues faites, aucune ligne ne porte plus de neuf cailloux.

Poser un nombre. Pour 2748, mettez 2 cailloux sur la ligne des milliers, 7 sur les centaines, 4 sur les dizaines et 8 sur les unités. Une ligne vide vaut zéro.

Additionner avec retenue. Ajoutez 1375 en posant 1, 3, 7 et 5 cailloux sur les mêmes lignes. La ligne des unités en compte alors 13 : retirez-en dix, posez-en un sur la ligne des dizaines, il en reste 3. La ligne des dizaines en compte 12 ; retenez encore, puis faites de même avec les centaines. L'abaque affiche 4123.

Multiplier. Videz l'abaque. Pour 47 × 23, posez trois fois 47 en faisant les retenues au fur et à mesure : 141. Posez ensuite deux fois 47, chaque caillou une ligne plus haut que d'habitude, ce qui ajoute 940. Faites les retenues et lisez 1081.

Passer au papier. Refaites les mêmes calculs en colonnes, la retenue écrite en petit au-dessus de la colonne suivante. Chaque colonne est une ligne de l'abaque, chaque chiffre un nombre de cailloux, chaque 0 une ligne vide.



La retenue sur l'abaque : dix jetons d'une ligne s'échangent contre un seul sur la ligne du dessus.

Changer de base. Pour écrire 4000 secondes en base soixante, divisez par 60 : 66, reste 40. Divisez 66 par 60 : 1, reste 6. Lisez le dernier quotient, puis les restes à rebours : 1, 6 et 40, soit 1 heure, 6 minutes et 40 secondes.

> **Sécurité.** Les petits cailloux présentent un risque d'étouffement pour les jeunes enfants. Choisissez des pierres trop grosses pour être avalées, ou rangez l'abaque hors de leur portée.

Histoire et évolution

La plus ancienne attestation datée avec certitude est une tablette de brouillon d'Ur, de 2043 av. J.-C., qui additionne des poids en base soixante. Vers 1800 av. J.-C., les tablettes des écoles babyloniennes en font un usage courant. Il n'y avait ni zéro ni marque séparant la partie entière des fractions : le lecteur jugeait de l'ordre de grandeur d'après le contexte. À partir de 700 av. J.-C. environ, certains scribes placent un signe dans une place vide au milieu d'un nombre, jamais à la fin. Les astronomes grecs ont gardé la base soixante pour les fractions, et c'est pourquoi l'heure et le degré comptent encore soixante minutes.

Les Mayas sont parvenus seuls à la numération de position et au zéro. Des dates en Compte long apparaissent dans le sud du Mexique dès le Ier siècle av. J.-C., et des stèles d'Uaxactun datées de 357 notent les places vides par un signe du zéro.

Nos chiffres viennent de l'Inde. En 628, Brahmagupta définit le zéro comme un nombre moins lui-même et donne des règles pour calculer avec lui, mais il se trompe en posant que zéro divisé par zéro vaut zéro. Le manuscrit de Bakhshali, découvert près de Peshawar en 1881, note le zéro par un point ; trois de ses feuillets, datés au radiocarbone en 2017, s'échelonnent du IIIe au Xe siècle, et la date du texte reste discutée. Le plus ancien zéro daté et incontesté de l'Inde se trouve à Gwalior, en 876.

Dans la Bagdad du IXe siècle, al-Khwarizmi écrit un traité du calcul indien, connu seulement en latin ; son nom a donné le mot algorithme. Fibonacci apprend les chiffres en Afrique du Nord et les enseigne dans son Liber abaci de 1202. En 1299, la corporation des changeurs de Florence les bannit de ses livres de comptes, et les abaques à jetons restent en usage dans le nord de l'Europe jusqu'au XVIe siècle.

À la fin du Moyen Âge, on comptait encore souvent en Europe avec des jetons de laiton sur un tapis ligné.

Chiffres clés

Numération de position en base soixante

Première attestation datée à Ur en 2043 av. J.-C. ; courante dans les écoles babyloniennes vers 1800 av. J.-C.

Le zéro traité comme un nombre

Brahmagupta, Brāhmasphuṭasiddhānta, 628 apr. J.-C.

Plus ancien zéro daté et incontesté en Inde

Inscription de Gwalior, 876, dans les nombres 270 et 50

Zéro maya

Signes du zéro sur des stèles d'Uaxactun datées de 357

Liber abaci

Fibonacci, Pise, 1202

Sources

1. Bases, positions and computations (Chemla, 2025) · Philosophical Transactions of the Royal Society B https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12536272/
2. On the Alleged Counting with Sexagesimal Place Value Numbers in Mathematical Cuneiform Texts from the Third Millennium B.C. (Friberg, 2005) · Cuneiform Digital Library Journal https://cdli.earth/articles/cdlj/2005-2
3. A history of Zero · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Zero/
4. Babylonian numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Babylonian_numerals/
5. Indian numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Indian_numerals/
6. Brahmagupta · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Brahmagupta/
7. Carbon dating finds Bakhshali manuscript contains oldest recorded origins of the symbol 'zero' · Gardens, Libraries and Museums, University of Oxford https://www.glam.ox.ac.uk/node/218481
8. The Bakhshālī Manuscript: A Response to the Bodleian Library's Radiocarbon Dating (Plofker, Keller, Hayashi, Montelle, Wujastyk, 2017) · History of Science in South Asia https://journals.library.ualberta.ca/hssa/index.php/hssa/article/view/22
9. The use of Zero as a placeholder by the Maya (J. G. Atkinson) · Mexicolore https://www.mexicolore.co.uk/maya/home/the-maya-and-zero/1000
10. The Calendar Inscriptions · Archaeology Magazine, Archaeological Institute of America https://archaeology.org/issues/november-december-2012/collection/calendar-inscriptions/
11. Arabic numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Arabic_numerals/
12. Fibonacci · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Fibonacci/
13. The mathematician Fibonacci, or how the number 7 came to Europe · Swiss National Museum https://blog.nationalmuseum.ch/en/2020/03/the-mathematician-fibonacci-or-how-the-number-7-came-to-europe/

Faits vérifiés le 2026-10-14

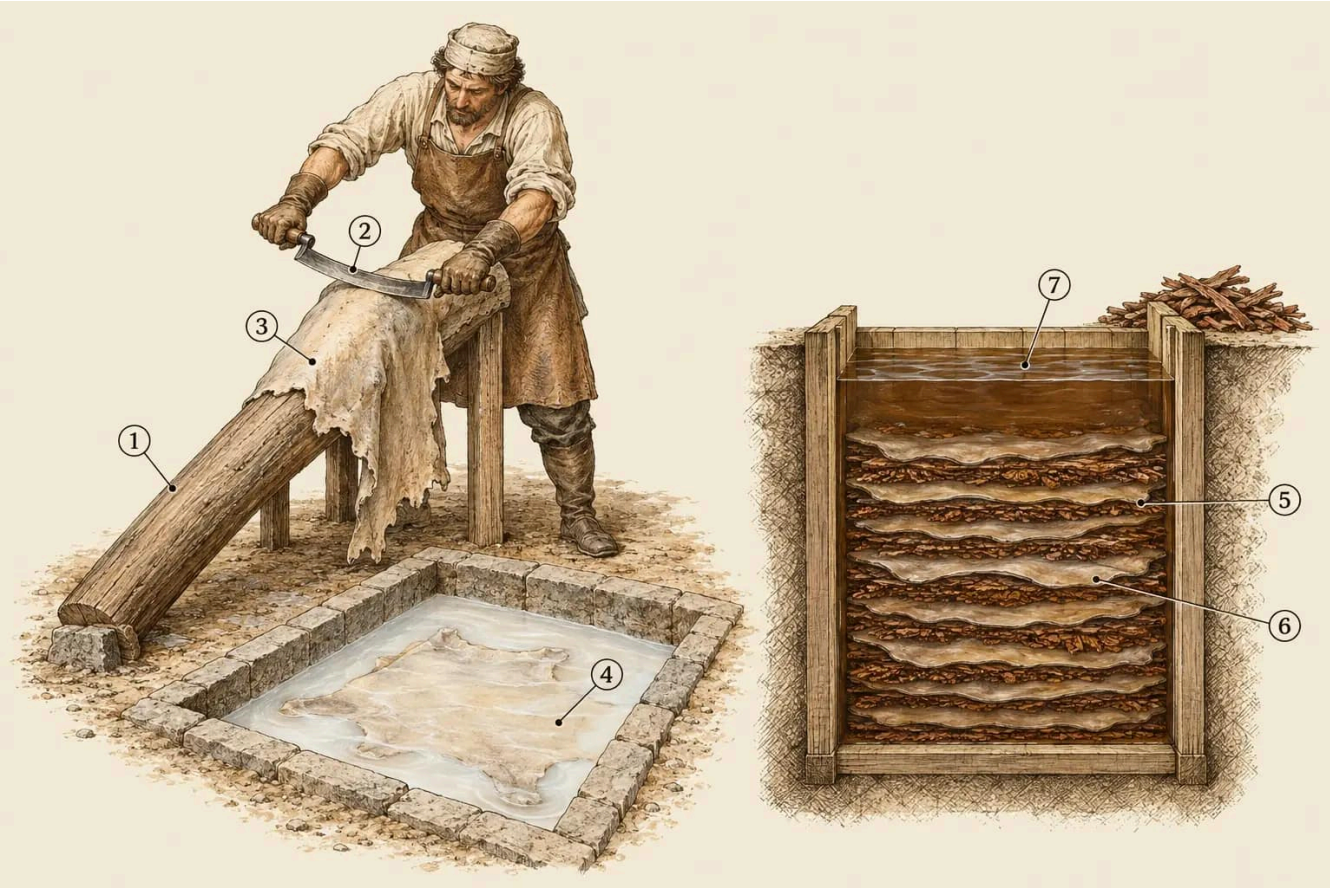
Tannage du cuir

Peaux, écorce de chêne, des mois en fosse

v. 1 500 av. J.-C. · Antiquité · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5), Maîtrise du feu (p. 9)

Mène à : Collier d'attelage (p. 180), Pompe à piston (p. 163)



1 Chevalet du tanneur 2 Couteau à deux poignées 3 Peau en cours d'épilage et d'écharnage 4 Fosse à chaux 5 Couche d'écorce de chêne broyée 6 Peau couchée dans la fosse 7 Jus de tannée

Le tannage transforme une peau crue, qui pourrit vite quand elle est humide et sèche dure comme du bois, en un cuir souple qui résiste bien mieux à la décomposition. Dans la méthode en fosse, on débarrasse la peau de ses poils et de sa chair, puis on la laisse des mois dans de l'eau et de l'écorce de chêne broyée, dont les tanins se fixent sur les fibres.

Ce que c’est

Une peau fraîche est faite surtout d’eau et de collagène, une protéine tissée en un feutre serré de fibres. Par temps chaud, elle commence à pourrir en quelques jours. Si elle sèche d’abord, elle devient une peau crue, dure et cornée, qui se ramollit dans l’eau et pourrit si elle reste mouillée.

Le cuir est une peau dont on a modifié les fibres pour qu’elle résiste à l’un et à l’autre. Il peut se mouiller et sécher avec bien moins de risque de pourrir ou de se raidir, on peut le couper, le coudre et le mouler, et, gardé au sec, il dure des siècles. On en faisait des chaussures, des harnais, des seaux et des soufflets. Les chasseurs

assouplissaient les peaux avec de la graisse et de la fumée, plus tard on a employé l'alun, et la plupart des cuirs sont aujourd'hui tannés aux sels de chrome. Cette planche suit la méthode qui a servi en Europe et en Méditerranée pendant quelque deux mille ans : le tannage végétal à l'écorce, en fosse.

Le cuir en coupe, grossi : la fleur lisse en surface, le feutrage des fibres de collagène dessous. À côté, une peau crue avec son poil.

Comment ça marche

Beaucoup de plantes accumulent des tanins, des composés amers qui les protègent des insectes et des champignons. L'écorce de chêne en est riche, tout comme le bois de châtaignier, les feuilles de sumac, les galles du chêne et les gousses d'acacia. L'écorce broyée qui trempe dans l'eau donne un liquide brun que les tanneurs appelaient jus de tannée.

Dans ce jus, les molécules de tanin se glissent entre les fibres de collagène d'une peau nettoyée et s'y accrochent en de nombreux points. Ainsi enrobées, les fibres ne se collent plus entre elles en séchant, et les bactéries les dégradent beaucoup plus lentement. La peau devient un cuir ferme et brun.

Le tanin pénètre depuis la surface. Un jus fort dès le départ fermerait les couches extérieures et laisserait un cœur cru. On commençait donc les peaux dans un jus faible, déjà servi, avant de les passer dans des jus plus forts au fil des semaines et des mois.

Il faut d'abord ouvrir la peau. L'eau de chaux ou une lessive de cendre de bois la fait gonfler, déchausse les racines des poils et enlève une partie de la graisse et des protéines molles. On peut alors racler le poil et la couche superficielle, puis nettoyer le côté chair, pour que le tanin entre par les deux faces.

Comment s'y prendre

Voici, dans ses grandes lignes, la méthode traditionnelle à l'écorce telle que la pratiquaient les tanneries, appliquée à une seule peau de vache ; ce n'est pas une recette éprouvée. Comptez presque un an. Il faut une peau d'un animal sain et d'origine connue, des cuves ou des tonneaux étanches, de la chaux éteinte ou de la cendre de bois, beaucoup d'écorce de chêne sèche, un chevalet en bois et un couteau émoussé à deux poignées.

Reverdir et chauler. Faites tremper une peau salée un jour ou deux dans de l'eau propre jusqu'à ce qu'elle soit souple, puis plongez-la dans de l'eau mêlée de chaux éteinte ou de lessive de cendre, en la remuant chaque jour. La peau est prête quand le poil s'arrache sous le pouce.

Épiler et écharner. Posez la peau sur le chevalet incliné, poil dessus, et poussez le couteau émoussé loin de vous pour enlever le poil. Retournez-la et raclez le côté chair pour ôter graisse et membranes. Rincez la chaux dans plusieurs eaux, car la chaux restée dans la peau gâche le tannage ; le jus faible et légèrement acide de l'étape suivante enlève ce qui reste.

L'écorce de chêne se lève au printemps, quand la sève la décolle du bois.

Préparer l'écorce. Écorcez des chênes abattus au printemps, faites sécher l'écorce, broyez-la et laissez-la tremper plusieurs jours dans l'eau.

Tanner en fosse. Mettez d'abord la peau dans un jus faible et remuez-la chaque jour pendant quelques semaines. Couchez-la ensuite à plat ou pliée dans une cuve, entre deux couches d'écorce broyée, et noyez-la dans un jus plus fort. Les tanneries empilaient ainsi de nombreuses peaux dans une même fosse. Renouvelez écorce et jus tous les quelques mois. Chez J & F J Baker, dans le Devon, dernière tannerie traditionnelle à l'écorce de chêne de Grande-Bretagne, les peaux passent trois mois dans le jus puis neuf autres empilées avec l'écorce. Pour vérifier, coupez un copeau dans la partie la plus épaisse : le cuir est tanné quand le brun a traversé toute l'épaisseur, sans trait pâle au milieu.

Sécher et nourrir. Rincez, laissez sécher lentement à l'ombre et faites pénétrer de l'huile ou du suif tant que le cuir est encore humide.

> **Sécurité.** La chaux et la lessive de cendre sont caustiques et peuvent brûler la peau et les yeux. Portez des gants étanches, des lunettes de protection et des bottes, et employez de la chaux éteinte plutôt que de la chaux vive, qui chauffe violemment au contact de l'eau. Rincez aussitôt à grande eau une éclaboussure sur la peau ; si de la chaux entre dans un œil, rincez-le sans arrêt à l'eau propre et obtenez immédiatement une aide médicale. Les peaux crues peuvent porter des spores de charbon (anthrax), qui entrent par les coupures ou se respirent avec la poussière et causent une maladie grave ; on ne voit pas à l'œil nu si une peau est contaminée. N'utilisez que des peaux d'animaux contrôlés et d'origine connue, jamais celle d'une bête trouvée morte, couvrez vos coupures, ne secouez ni ne battez les peaux sèches, et lavez mains et vêtements après le travail. Si vous pensez avoir été exposé, ou si une plaie, de la fièvre ou une gêne respiratoire suit un travail sur des peaux, consultez un médecin sans attendre en précisant que vous manipulez des peaux. Les bains de chaux et les jus de tannée polluent : gardez-les dans des cuves étanches, loin des puits, des sources et des ruisseaux, et ne versez jamais les jus usés sur le sol, dans les égouts ou dans l'eau ; portez-les à un point de collecte adapté.

Histoire et évolutions

On a préparé les peaux bien avant de les tanner. Dans bien des régions, les chasseurs faisaient pénétrer de la cervelle ou d'autres graisses dans une peau raclée, puis la fumaient, pour qu'elle puisse se mouiller sans durcir. Ötzi, mort dans les Alpes vers 3300 av. J.-C., portait des peaux de chèvre, de mouton, de cerf et de veau, et une chaussure de la grotte d'Areni-1, en Arménie, datée de 3627–3377 av. J.-C., semble taillée dans du cuir de vache. On ne sait pas bien comment l'une et l'autre ont été traitées.

Bien avant les fosses, on tendait les peaux, on les raclait, on les travaillait à la graisse et on les fumait.

Dater le tannage végétal est difficile : seule l'analyse chimique révèle comment un cuir ancien a été traité, et les spécialistes n'en lisent pas les résultats de la même façon. Carol van Driel-Murray note que les cuirs de l'âge du bronze étaient le plus souvent traités à la graisse, à l'huile ou à la fumée. Pourtant, l'analyse de cuirs égyptiens du Metropolitan Museum, publiée en 2017, a trouvé des tanins végétaux dans des objets du Moyen ou du Nouvel Empire, entre 2000 et 1100 av. J.-C. environ. Le botaniste grec Théophraste parle des plantes à tan vers 300 av. J.-C., et dans le

nord-ouest de l’Europe le cuir tanné arrive avec la conquête romaine. À Pompéi, une tannerie de quinze cuves cylindriques fonctionnait encore quand l’éruption de 79 apr. J.-C. l’a ensevelie.

La mégisserie à l’alun, qui emploie un sel minéral au lieu du tanin, donnait un cuir pâle et souple apprécié pour les gants, mais l’eau en chasse l’alun et la peau peut redevenir dure en séchant. Le tannage en fosse a peu changé jusqu’à la fin du XIXe siècle, quand les sels de chrome ont réduit le travail de quelques mois à quelques jours. Le tannage au chrome est un procédé industriel aux déchets toxiques, pas un artisanat domestique. On fait encore du cuir tanné à l’écorce pour les selles, les ceintures et les semelles.

Chiffres clés

Durée en fosse
Environ 12 mois dans une tannerie anglaise à l'écorce encore en activité ; 11 à 18 mois, parfois 2 ans, pour les gros cuirs de bœuf en 1810

Plus ancienne chaussure en cuir connue
Grotte d'Areni-1, Arménie, 3627–3377 av. J.-C. ; on ignore comment le cuir a été traité

Tannerie de Pompéi
15 cuves cylindriques, en service jusqu'à l'éruption de 79 apr. J.-C.

Chaulage
Quelques jours pour les peaux de bœuf et de vache, deux à trois semaines pour les veaux (pratique décrite en 1810)

Plus anciens tanins végétaux détectés dans un cuir
Objets égyptiens du Moyen ou du Nouvel Empire, vers 2000–1100 av. J.-C. (analyse publiée en 2017)

Sources

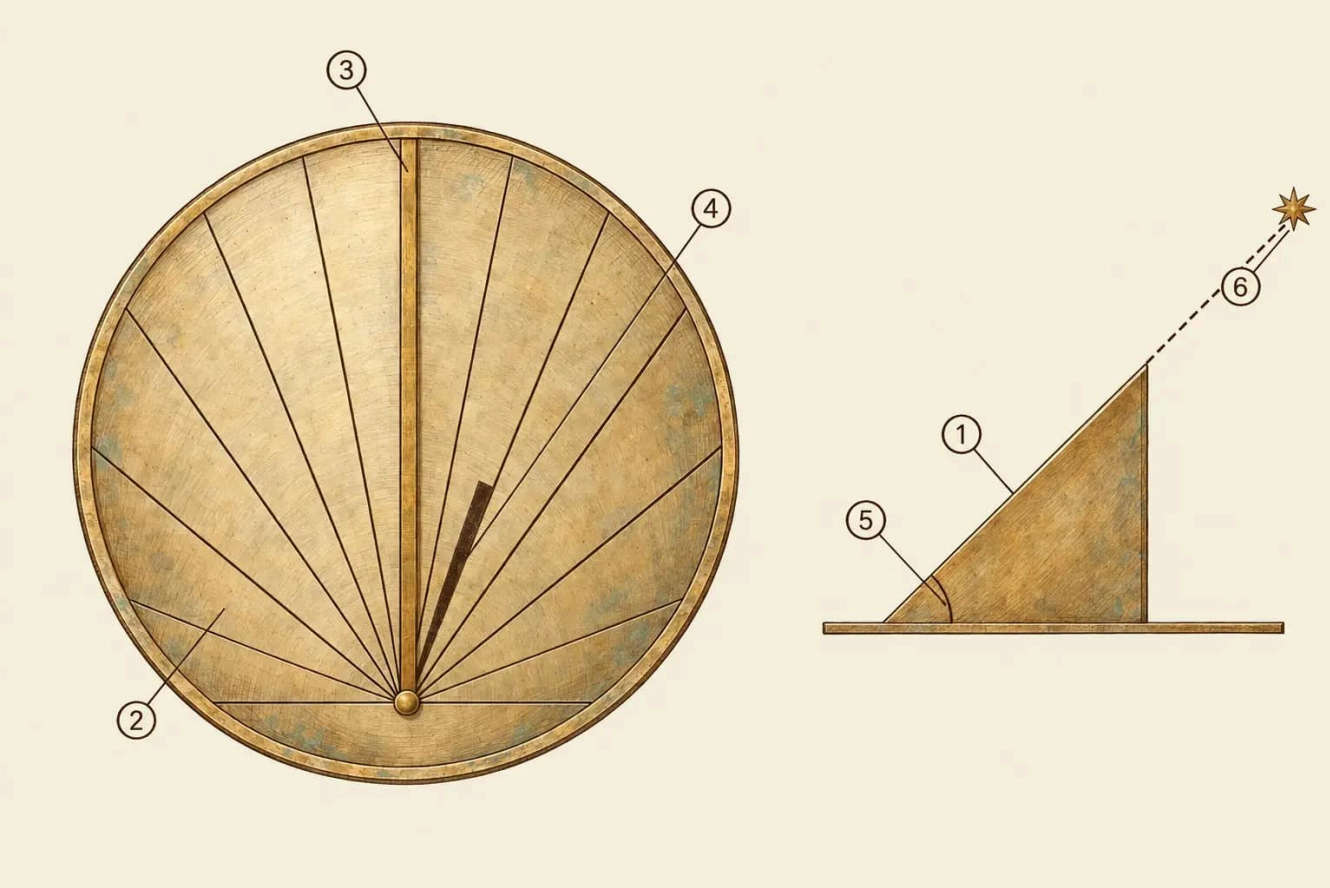
1. Tanning (Encyclopaedia Britannica, 4th edition, 1810) · Encyclopaedia Britannica, transcribed by Jim Clifford, University of Saskatchewan https://jimclifford.ca/early_encyclopedia_britannica/articles/1810/eb_4th_1810_020179.html
2. The Process · J & F J Baker & Co., oak bark tannery, Colyton https://www.jfjbaker.co.uk/the-process
3. Hide Products · Sean Manning, Book and Sword (after C. van Driel-Murray) https://www.bookandsword.com/?p=10459
4. First Direct Evidence of Chalcolithic Footwear from the Near Eastern Highlands (Pinhasi et al., 2010) · PLoS ONE https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0010984
5. Evidence of the use of vegetable tannins in leather tanning in the Middle Kingdom/New Kingdom of ancient Egypt (Elnaggar, 2017) · ICOM-CC Leather and Related Materials Working Group Newsletter https://www.icom-cc.org/dlfile.aspx?file=https://www.icom-cc.org/docs/content/ICOMCC-LRM-Newsletter-june-2017.pdf
6. The large tannery of Pompeii: from restoration to valorisation · Archaeological Park of Pompeii https://pompeiisites.org/en/comunicati/the-large-tannery-of-pompeii-from-restoration-to-valorisation-a-positive-example-of-public-and-private-sector-collaboration/
7. Skins & hides: introduction · Lowimpact.org https://www.lowimpact.org/categories/skins-hides
8. Leather terminology: tawing · Popov Leather https://popovleather.com/pages/leather-terminology-tawing
9. Anthrax: people at increased risk (animal products) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/anthrax/animal-products/products.html
10. Hydrated Lime, Safety Data Sheet CASDS06 · Cement Australia https://cementaustralia.com.au/sites/default/files/2025-02/CASDS06_Hydrated_Lime.pdf
11. Clothing of the Iceman · South Tyrol Museum of Archaeology https://www.iceman.it/en/clothing/

Faits vérifiés le 2026-10-13

Cadran solaire

Lire l'heure dans une ombre

v. 1 500 av. J.-C. · Antiquité · Établissement



1 Style (l'arête qui porte l'ombre) 2 Table du cadran 3 Ligne de midi 4 Ombre 5 Angle égal à la latitude 6 Pôle céleste

Un cadran solaire donne l'heure grâce à l'ombre que le Soleil projette sur une surface graduée. Les plus anciens exemplaires conservés viennent d'Égypte, au XVe siècle avant notre ère, et jusqu'à la diffusion des horloges mécaniques à la fin du Moyen Âge, il a été le principal moyen de découper la journée.

Ce que c'est

Un cadran solaire est un instrument qui indique l'heure par la position d'une ombre. Une tige ou une lame, le gnomon, se dresse au-dessus d'une surface tracée de lignes, et son ombre les parcourt à mesure que le Soleil traverse le ciel.

La planche montre un cadran horizontal de jardin, calculé pour la latitude 45°, vu de dessus, avec son gnomon vu de profil. L'arête inclinée du gnomon, le style, vise le pôle céleste : c'est ce qui rend les heures égales en toute saison.

Comment ça marche

La Terre tourne en un jour autour d'un axe qui pointe, dans l'hémisphère Nord, tout près de l'étoile Polaire. Vu du sol, le Soleil tourne autour de ce même axe, à raison de 15° par heure. Un style placé parallèlement à cet axe se

trouve donc au centre du cercle que le Soleil décrit chaque jour, et le plan qui passe par le style et le Soleil tourne au même rythme régulier, quelle que soit la saison. Concrètement, le style est incliné vers le nord (vers le sud dans l'hémisphère austral) d'un angle égal à la latitude : environ 48,9° à Paris, 43,3° à Marseille.

Sur un cadran horizontal, ce plan tournant coupe une table plane : l'ombre s'y déplace de façon inégale, et les lignes horaires ne sont pas équidistantes. L'angle entre la ligne de midi et la ligne d'une heure donnée obéit à une règle simple : sa tangente vaut le sinus de la latitude multiplié par la tangente de 15° par heure écoulée depuis midi. À 45°, les lignes d'une à six heures après midi tombent à environ 11°, 22°, 35°, 51°, 69° et 90°. Elles se serrent autour de midi et s'écartent vers six heures, à angle droit de la ligne de midi.

Horloge à ombre égyptienne : le matin, la traverse faisait face à l'est, et l'on retournait l'instrument à midi.

Un cadran solaire donne l'heure solaire locale, pas celle d'une montre. L'heure légale suit le méridien central du fuseau horaire : un cadran retarde donc de 4 minutes par degré de longitude à l'ouest de ce méridien, et avance d'autant par degré à l'est. Comme l'orbite terrestre est une ellipse et que l'axe de la Terre est incliné, le Soleil avance ou retarde en outre jusqu'à 16 minutes environ selon la période de l'année : c'est l'équation du temps, souvent gravée dans un petit tableau près du cadran. L'heure d'été ajoute encore une heure.

Comment le construire

Il faut une plaque plane d'ardoise, de pierre, de bois dur ou de métal d'une trentaine de centimètres, un triangle mince de laiton ou d'aluminium pour le gnomon, un rapporteur, une règle, un niveau à bulle et une calculatrice. Les indications qui suivent valent pour l'hémisphère Nord ; au sud de l'équateur, placez le centre près du bord nord et faites monter le style vers le sud.

Tracer les lignes horaires. Relevez votre latitude sur une carte, au dixième de degré près. Marquez le centre du cadran près du bord sud de la plaque et tirez la ligne de midi jusqu'au bord opposé. Pour chaque heure, calculez l'angle avec la règle ci-dessus et tracez la ligne de part et d'autre de la ligne de midi : les heures du matin à l'ouest, celles de l'après-midi à l'est. Tracez directement les lignes de six heures à 90°, là où la règle ne s'applique plus : ce cadran simple couvre les heures de six heures à dix-huit heures.

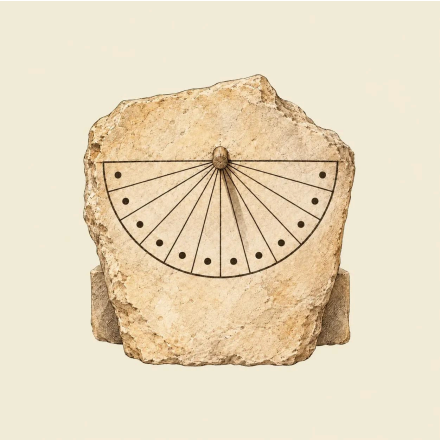
Découper le gnomon. Taillez un triangle rectangle dont l'angle aigu est égal à votre latitude. Fixez-le debout sur la ligne de midi, la pointe sur le centre du cadran, de façon que l'arête inclinée monte vers le nord. Si la lame dépasse deux ou trois millimètres d'épaisseur, écartez les deux moitiés du cadran de cette épaisseur : les lignes du matin partent d'une face, celles de l'après-midi de l'autre.

Trouver le nord géographique. Une boussole indique le nord magnétique, qui peut s'en écarter de plusieurs degrés. Par une journée de soleil, plantez un bâton vertical sur un sol plat, marquez l'extrémité de son ombre en milieu de matinée et tracez un cercle passant par ce point, centré sur le pied du bâton. L'après-midi, marquez l'endroit où l'extrémité de l'ombre touche de nouveau le cercle. La droite qui joint les deux marques va d'est en ouest, la marque du matin étant à l'ouest. Debout sur la marque du matin, face à celle de l'après-midi, vous avez le nord à votre gauche. Le résultat reste approché, car la course du Soleil se décale un peu au cours de la journée ; il est meilleur près des solstices.

Installer le cadran. Posez-le sur un support de niveau, la ligne de midi sur la direction nord-sud et le gnomon montant vers le nord.

> **Sécurité.** Ne regardez jamais le Soleil en face, même un instant, et jamais à travers des jumelles ou une lentille : les lésions de l'œil sont indolores et peuvent être définitives. Ébavurez les arêtes d'un gnomon en métal et placez le cadran là où personne ne risque de tomber sur sa lame.

Histoire et évolution



Cadran peint sur un éclat de calcaire, découvert en 2013 dans la Vallée des Rois et daté du XIIIe siècle av. J.-C.

Les plus anciens cadrans conservés sont des horloges à ombre égyptiennes du règne de Thoutmôsis III (vers 1479 à 1425 av. J.-C.). Ce sont des règles de pierre en forme de L : le matin, la traverse dressée à une extrémité faisait face à l'est et projetait son ombre sur des repères gravés le long de la règle ; à midi, on retournait l'instrument vers l'ouest. En 2013, une équipe de l'université de Bâle a trouvé un autre type de cadran sur le sol d'une cabane d'ouvrier, dans la Vallée des Rois : un éclat de calcaire plat, peint d'un demi-cercle noir divisé en douze secteurs, avec au centre un trou destiné à une cheville.

La tradition grecque attribue à Anaximandre de Milet, vers 560 av. J.-C., l'introduction du gnomon en Grèce, d'après des pratiques babyloniennes. Grecs et Romains taillaient des cadrans hémisphériques, des cuvettes de pierre dont les lignes partageaient la durée du jour en douze parties. Ces heures étaient inégales : une heure d'été durait plus longtemps qu'une heure d'hiver. Pline l'Ancien rapporte deux dates pour le premier cadran public de Rome, 293 et 263 av. J.-C. Le second fut rapporté de Catane, en Sicile, pendant la première guerre punique. Tracé pour la Sicile, il indiquait à Rome une heure un peu fausse, et servit pourtant 99 ans, jusqu'à ce qu'on installe à côté de lui un cadran plus juste, en 164 av. J.-C.

Au VIIIe siècle, le moine anglais Bède le Vénérable encouragea les cadrans qui marquaient les heures de la prière, et beaucoup d'églises médiévales portaient un simple cadran gravé sur une pierre de leur mur sud. Un style parallèle à l'axe de la Terre donne des heures égales toute l'année. L'astronome Ibn al-Shatir en construisit un en 1371 pour la mosquée des Omeyyades de Damas, et les cadrans européens appliquent ce principe depuis au moins 1446. Les horloges mécaniques se répandirent en Europe à partir du XIVe siècle, mais pendant longtemps elles restèrent imprécises, et on les réglait sur les cadrans solaires.

Un cadran canonial : une cheville plantée dans le trou central projetait son ombre sur les lignes.

Chiffres clés

Plus anciens cadrans conservés
Égypte, règne de Thoutmôsis III (vers 1479 à 1425 av. J.-C.)

Mouvement apparent du Soleil
15° par heure autour du pôle céleste

Inclinaison du style
Égale à la latitude du lieu (environ 48,9° à Paris)

Équation du temps
Le Soleil avance ou retarde jusqu'à 16 minutes environ au fil de l'année

Sources

1. Ancient sundials · North American Sundial Society https://sundials.org/index.php/all-things-sundial/ancient-sundials?start=9
2. How sundials work · British Sundial Society https://sundialsoc.org.uk/all-about-sundials/how-sundials-work/
3. Pliny the Elder, Natural History, book 7 (7.212-215 on Rome's first sundials) · Attalus.org (translation) https://www.attalus.org/pliny/hn7c.html
4. Monumental Timekeepers (David Rooney) · Lapham's Quarterly https://www.laphamsquarterly.org/node/11636
5. Sundial · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sundial
6. History of sundials · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_sundials
7. General Solar Position Calculations · NOAA Global Monitoring Laboratory https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF
8. The Sundial Primer: Horizontal Sundial (Carl Sabanski) · The Sundial Primer https://mysundial.ca/tsp/horizontal_sundial.html

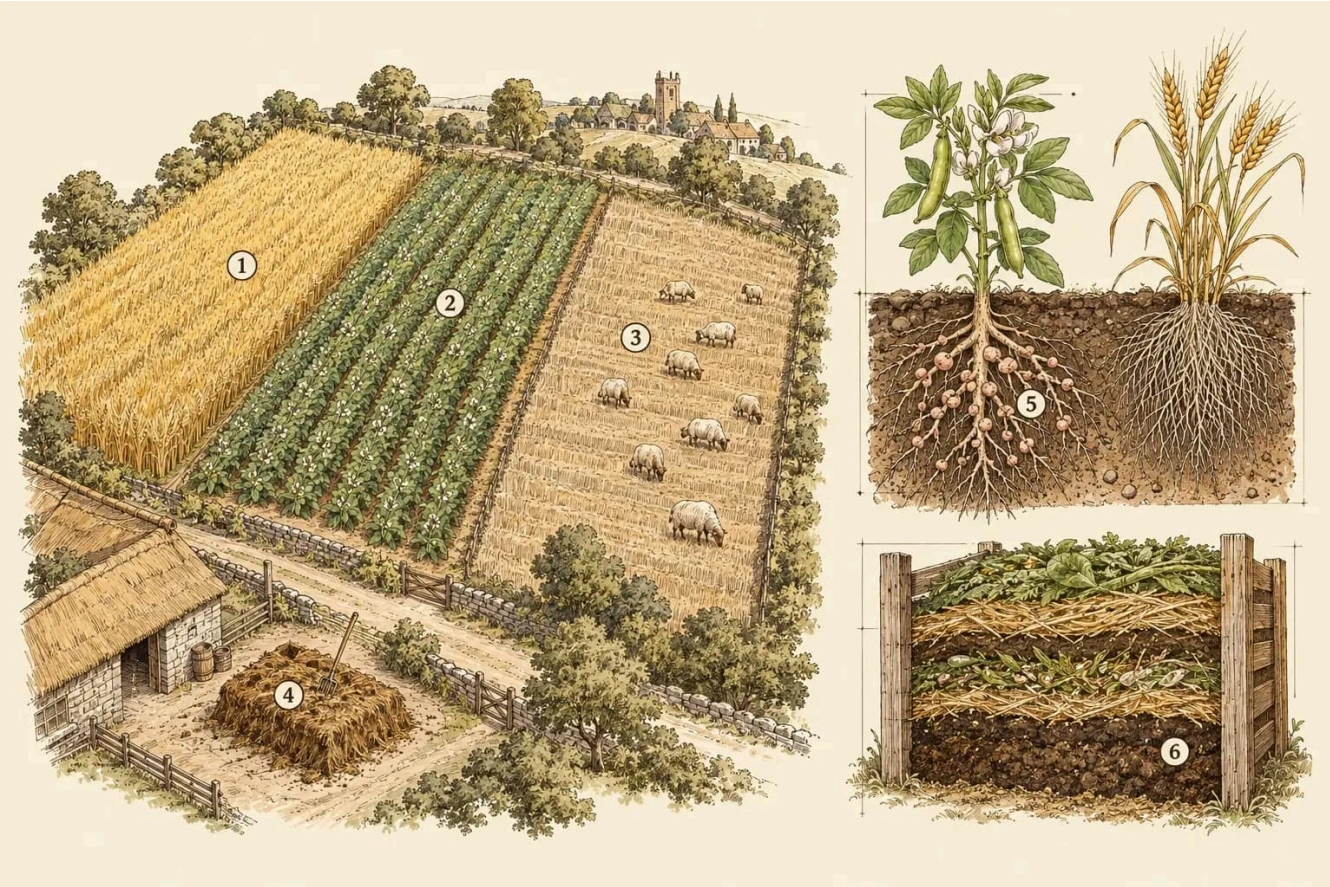
Faits vérifiés le 2026-10-12

Rotation des cultures

Garder la terre fertile d'année en année

v. 700 av. J.-C. · Antiquité · Établissement

Nécessite: Charrue (p. 61)



1 Blé d'hiver 2 Fèves et pois 3 Jachère pâturée par les moutons 4 Tas de fumier 5 Nodosités sur une racine de fève 6 Couches d'un tas de compost

La rotation des cultures change d'une année à l'autre ce qui pousse sur un champ, et s'appuie sur la jachère, le fumier et les légumineuses pour rendre à la terre ce que les récoltes lui prennent. Elle garde le sol fertile et affame les parasites de chaque culture; en Europe, elle est passée d'une année de repos sur deux à des assolements sans aucune jachère.

Ce que c'est

Semé chaque année de la même plante, un champ tend à donner moins si l'on ne lui rend pas ce qu'il a perdu. Les racines puisent les mêmes éléments dans la même terre, et les parasites de cette culture retrouvent leur hôte à chaque printemps. La rotation des cultures change ce qui pousse sur chaque parcelle d'une année à l'autre, selon un cycle fixé à l'avance.

Elle va de pair avec la jachère, une saison sans culture; avec le fumier et le compost, qui rendent au sol les déjections et les déchets végétaux; et avec les légumineuses, comme la fève, le pois ou le trèfle, qui apportent de

l'azote tiré de l'air. La planche montre une ferme à trois soles et son tas de fumier. À droite, une racine de fève est dessinée à côté d'une racine de blé, au-dessus d'un tas de compost ouvert.

Comment ça marche

Outre l'eau et l'air, une plante a besoin d'éléments minéraux tirés du sol, dont trois en grande quantité. L'azote sert à fabriquer les protéines et les feuilles ; une céréale qui en manque jaunit. Le phosphore nourrit les racines et les graines. Le potassium retient l'eau dans les cellules et tient les tiges droites. Chaque sac de grain qui quitte la ferme en emporte une part.

L'azote est le premier à manquer, alors que l'air en contient près de quatre cinquièmes sous forme de gaz : les plantes ne savent pas utiliser ce gaz. Les légumineuses y parviennent grâce à des bactéries du sol, les rhizobiums. Celles-ci s'installent dans de petits renflements des racines, les nodosités, et transforment l'azote de l'air en ammoniac ; la plante en tire ses protéines et nourrit en retour les bactéries avec des sucres. Quand les racines et les tiges pourrissent, ou quand on enfouit la culture en vert, une bonne part de cet azote profite à la culture suivante. Un trèfle violet ou blanc bien installé peut fixer environ 85 à 225 kg d'azote par hectare et par an, une culture courte ou chétive beaucoup moins.

Nodosités sur une racine de pois. Une nodosité active est rose ou rouge à l'intérieur.

Le phosphore et le potassium ne viennent pas de l'air ; ils reviennent avec le fumier, le compost, l'urine et les cendres.

Changer de culture freine aussi les maladies et les ravageurs propres à une famille de plantes : privés de leur hôte quelques années, la plupart reculent. Certains durent bien plus longtemps. Les spores de la hernie des crucifères, qui touche choux et navets, peuvent rester jusqu'à 20 ans dans le sol, et la pourriture blanche de l'oignon au moins 15 ans : mieux vaut alors ne plus y cultiver leurs hôtes. La jachère n'apporte pas d'azote, mais elle permet de labourer les mauvaises herbes et sert de pâture.

Comment s'y prendre

Outils : une bêche ou une charrue, une fourche et des planches pour un bac.

Partager le terrain. Tracer quatre parcelles de même taille et répartir les légumes en quatre groupes, en gardant ensemble les plantes apparentées : légumineuses (pois, fèves, haricots) ; choux, chou frisé, navets et radis ; pommes de terre et tomates ; oignons et racines (poireaux, carottes, betteraves, panais).

Avancer chaque groupe d'une parcelle par an. Un ordre courant : légumineuses, choux, pommes de terre, puis oignons et racines. Les choux suivent les légumineuses pour profiter de l'azote laissé dans le sol.

Semer un engrais vert sur la terre nue. Après une récolte précoce, semer un engrais vert et l'enfouir encore tendre, quelques semaines avant la culture suivante. Le trèfle, la vesce et la féverole sont des légumineuses : les semer là où viendront les choux, pas là où sont prévus pois et fèves.

Monter le tas de compost. Sur la terre nue, à mi-ombre, installer un bac d'environ un mètre de côté. Alterner des couches d'une quinzaine de centimètres de matières vertes et tendres (herbe, épluchures, fumier frais d'herbivores) et de matières brunes et sèches (paille, feuilles mortes, carton), avec au moins autant de brun que de vert. Ajouter de temps en temps un peu de terre ; garder le tas humide comme une éponge essorée.

Un tas qui travaille bien fume par un matin froid.

Retourner et surveiller la chaleur. Enfoncer un long thermomètre au cœur du tas. Un tas qui tient 55 °C ou plus pendant plusieurs jours tue bien des germes et des graines de mauvaises herbes, mais seul le cœur chauffe autant : à chaque refroidissement, ramener à la fourche l'extérieur vers le centre et laisser le tas se réchauffer. Le compost est mûr quand il est sombre, grumeleux et sent le sous-bois, au bout de quelques mois à plus d'un an.

Manier le fumier avec soin. Épandre le fumier de bovins, de chevaux, de moutons, de chèvres ou de volailles à l'automne et l'enfouir, jamais sur des plantes en place.

> **Sécurité.** Le fumier frais porte des germes comme *E. coli* et les salmonelles. Un fumier qui a l'air bien décomposé, et le compost de jardin qui en contient, peuvent encore en porter, car un tas domestique ne chauffe jamais de façon égale : les traiter tous deux comme du fumier frais. Les épandre au moins 120 jours avant de récolter les plantes dont la partie mangée touche le sol ou peut recevoir des éclaboussures de terre par la pluie ou l'arrosage, comme la salade, les carottes ou les fraises, et au moins 90 jours avant les autres récoltes. Ne jamais mettre d'excréments de chien, de chat, de porc ou humains sur un potager ni dans son compost. Se laver les mains au savon après avoir manié fumier ou compost et avant de toucher les aliments, et laver les légumes à l'eau potable. Femmes enceintes, jeunes enfants, personnes âgées et personnes immunodéprimées ne devraient pas manger crus les légumes d'un sol fumé.

Histoire et évolutions

Les isotopes de l'azote mesurés dans des grains carbonisés de 13 sites néolithiques, de la Grèce à la Grande-Bretagne, montrent que les cultures étaient fumées dès 6000 av. J.-C. environ.

Le conseil d'Hésiode sur la jachère, vers 700 av. J.-C., compte parmi les plus anciens textes conservés sur le sujet et donne sa date à cette planche. Varron, en 37 av. J.-C., décrit des lupins ou des fèves semés sur sol maigre et enfouis au début de la formation des gousses, à la place du fumier. Un siècle plus tard, Columelle juge le lupin enfoui aussi bon que le meilleur fumier, mais doute que la fève récoltée pour ses graines enrichisse la terre.

En Chine, le Qimin Yaoshu, un manuel d'agriculture achevé vers 544 par Jia Sixie, veut qu'on change chaque année la culture des champs de millet et désigne le haricot mungo et le haricot adzuki comme les meilleurs précédents du millet.

Entre la Loire et le Rhin, de nombreux domaines francs passent à la fin du VIIIe et au IXe siècle de deux soles, la moitié des terres au repos chaque année, à trois : blé ou seigle d'hiver, puis avoine, orge, pois et fèves semés au printemps, puis jachère. Les semis de printemps demandent des pluies d'été, si bien que le système reste au nord des Alpes.

Les plantes fourragères remplacent ensuite la jachère. L'assolement quadriennal du Norfolk, au XVIIIe siècle, associé à Charles Townshend, fait se succéder blé, navets, orge et trèfle. L'historien de l'économie Robert Allen attribue aux plantes fixatrices d'azote environ la moitié de la hausse des rendements en grain anglais entre le Moyen Âge et la révolution industrielle.

En 1838, Jean-Baptiste Boussingault constate que le trèfle et le pois gagnent de l'azote dans un sol sans matière organique, contrairement au blé et à l'avoine. En 1886, Hermann Hellriegel et Hermann Wilfarth relient ce gain aux nodosités et à leurs microbes, et en 1888 Martinus Beijerinck isole la bactérie.

Parqués sur les navets, les moutons mangent la récolte sur place et fument la terre pour l'orge qui suit.

Chiffres clés

Indices anciens de fumure
Europe néolithique, dès 6000 av. J.-C. environ (isotopes de l'azote dans les grains)

Assolement triennal
Pays francs, fin du VIIIe et IXe siècle ; la jachère passe de la moitié au tiers des terres

Rôle des bactéries des nodosités
Hellriegel et Wilfarth, 1886 ; publié en 1888

Conseil écrit ancien sur la jachère
Hésiode, Grèce, vers 700 av. J.-C.

Azote fixé par un trèfle bien installé
Environ 85 à 225 kg par hectare et par an

Sources

1. Hesiod, Works and Days, lines 458–464 (trans. H. G. Evelyn-White) · Theoi Classical Texts Library https://www.theoi.com/Text/HesiodWorksDays.html
2. Varro, On Agriculture, Book I (trans. W. D. Hooper and H. B. Ash) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Varro/de_Re_Rustica/1*.html
3. Columella, On Agriculture, Book II (trans. H. B. Ash) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Columella/de_Re_Rustica/2*.html
4. Manure used by Europe's first farmers 8,000 years ago (Bogaard et al., PNAS 2013) · University of Oxford via ScienceDaily https://www.sciencedaily.com/releases/2013/07/130716134740.htm
5. Millet: Original Chinese Staple (on the Qimin Yaoshu) · Science and Technology Daily https://www.stdaily.com/web/English/2026-05/25/content_522073.html
6. Agricultural technique, in A. Verhulst, The Carolingian Economy · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/books/carolingian-economy/agricultural-technique/BA332C43E77E49855C580F1276F12809
7. Lynn White Jr., Technology in the Middle Ages (Technology in Western Civilization, vol. 1, 1967, excerpt) · Manchester University (course reading) https://users.manchester.edu/FacStaff/SSNaragon/Kant/LP/Readings/White,%20Plow.html
8. Norfolk four-course system · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Norfolk_four-course_system
9. The Nitrogen Hypothesis and the English Agricultural Revolution: A Biological Analysis (R. C. Allen, 2008) · Journal of Economic History, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-economic-history/article/nitrogen-hypothesis-and-the-english-agricultural-revolution-a-biological-analysis/7B2406F0F800AA11E4843EDB58D558C6
10. Utilisation biologique de l'azote de l'air : repères chronologiques · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/utilisation-biologique-de-l-azote-de-l-air-reperes-chronologiques/
11. Prof. Dr. Hermann Hellriegel · Anhalt University of Applied Sciences https://www.hs-anhalt.de/en/life/bernburg/campus/history/prof-dr-herrmann-hellriegel.html
12. Is Nitrogen Fixation Oversold with Legume Cover Crops? · University of Nebraska–Lincoln, CropWatch https://cropwatch.unl.edu/2016/nitrogen-fixation-oversold-legume-cover-crops
13. Crop rotation · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/vegetables/crop-rotation
14. Club root · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/disease/club-root
15. Onion white rot · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/disease/onion-white-rot
16. Aged manure is not composted manure · University of Minnesota Extension https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2022/02/aged-manure-is-not-composted-manure.html
17. Composting · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/soil-composts-mulches/composting
18. Composting Manure and Other Organic Materials (NebGuide G1315) · University of Nebraska–Lincoln Extension https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1315/na/pdf/view
19. Guidelines for Using Manure on Vegetable Gardens (Bulletin 2510) · University of Maine Cooperative Extension https://extension.umaine.edu/publications/2510e/

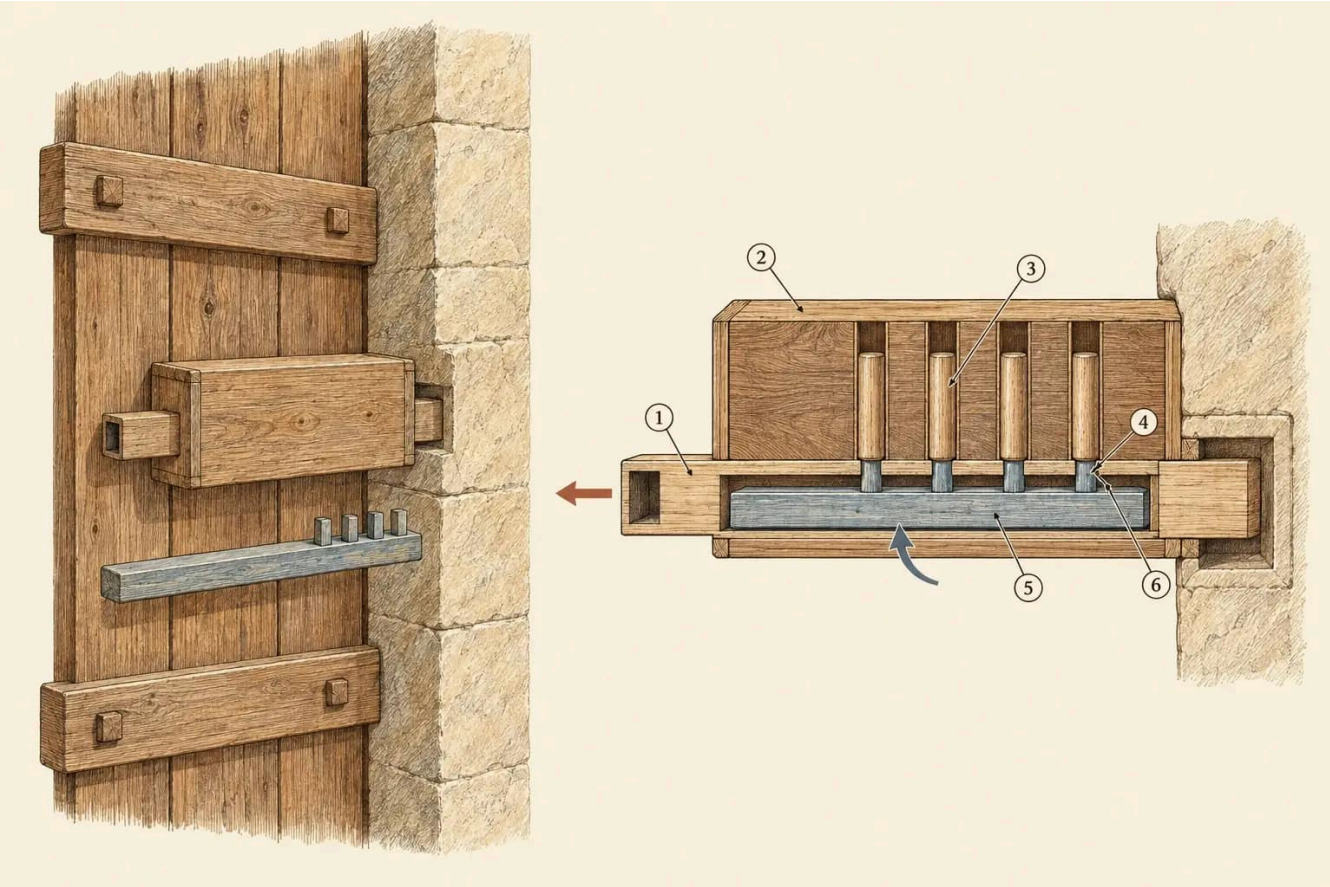
Faits vérifiés le 2026-10-14

Serrure & clé

Un pêne que seule sa clé libère

v. 700 av. J.-C. · Antiquité · Établissement

Nécessite : Outils de pierre (p. 5)



1 Pêne 2 Boîtier de la serrure 3 Chevilles 4 Trous du pêne 5 Clé 6 Dents de la clé

Une serrure retient un pêne jusqu'à ce qu'une clé de la bonne forme le libère. Les serrures en bois à chevilles existaient déjà dans le Proche-Orient ancien, et le même principe, perfectionné au XIXe siècle, fait fonctionner la plupart des cylindres de porte actuels.

Ce que c'est

Une serrure maintient fermés une porte, un couvercle ou une chaîne, et une serrure à clé est conçue pour ne s'ouvrir qu'avec la clé correspondante. Toute serrure à clé comporte un pêne qui assure la fermeture, un obstacle qui bloque ce pêne, et une clé dont la forme lève l'obstacle.

La planche montre la serrure en bois à chevilles, souvent appelée serrure égyptienne. Elle ne demande ni métal ni ressort, et fonctionne pourtant déjà comme un cylindre moderne à goupilles.

Comment ça marche

Le boîtier est un bloc de bois fixé à l'intérieur de la porte. Un pêne carré coulisse dans un tunnel percé dans sa partie basse, et son extrémité entre dans une gâche creusée dans le montant. Le pêne est creux, et sa paroi

supérieure est percée d'une rangée de trous. Au-dessus, des chevilles de bois libres pendent dans des trous verticaux du boîtier. Quand on pousse le pêne en place, les chevilles tombent par leur propre poids dans les trous et le bloquent.

La clé est une longue barre plate portant des dents disposées comme les trous. On la glisse dans le creux du pêne, puis on la soulève. Les dents repoussent les chevilles jusqu'à ce que leur extrémité inférieure affleure le dessus du pêne, et l'on peut alors tirer le pêne, la clé toujours engagée dedans. Avec une dent mal placée, une cheville au moins reste dans son trou.

Les serrures plus tardives ont employé d'autres organes de blocage. Une serrure à gardes comporte des obstacles fixes, les gardes, sur le trajet de la clé qui tourne, et seule une clé entaillée aux bons endroits peut tourner assez loin pour pousser le pêne. Une serrure à gorges possède une pile de leviers pivotants qu'il faut tous soulever exactement à la bonne hauteur avant que le pêne puisse passer.

Dans une serrure à gardes, les entailles du panneton permettent à la clé de tourner sans heurter les gardes fixes et de pousser le pêne.

Le cylindre moderne à goupilles garde l'idée de chevilles que la clé doit soulever à une hauteur précise. Un rotor de laiton tourne dans un stator fixe. Cinq ou six paires de goupilles, poussées vers le bas par de petits ressorts, traversent la limite entre les deux pièces et empêchent le rotor de tourner. Les crans de la clé soulèvent chaque paire de sorte que la jonction entre goupille inférieure et goupille supérieure tombe exactement sur cette limite, la ligne de cisaillement, et le rotor tourne.

Comment la construire

Une serrure en bois à chevilles est un bon projet de week-end pour une boîte ou un placard. On l'ouvre sans clé avec un peu de patience : c'est une pièce de démonstration.

Faire le pêne. Prenez une barre de bois dur de 40 mm de large, 45 mm de haut et 40 cm de long. Creusez sous la barre une rainure de 20 mm de large et 30 mm de profondeur, depuis l'extrémité intérieure jusqu'au-delà du milieu, puis collez dessous une baguette mince pour en faire un tunnel. Les 15 mm de bois qui restent au-dessus de la rainure forment la paroi supérieure. Percez-y trois ou quatre trous de 10 mm, à intervalles irréguliers.

Faire le boîtier. Façonnez un bloc autour d'un tunnel carré où le pêne puisse coulisser, en le perçant puis en l'équarrissant au ciseau, ou en collant quatre planches autour du pêne. Le pêne en position fermée, percez le bloc à la verticale jusqu'aux trous du pêne pour que tout soit bien aligné. Coupez une cheville de 10 mm pour chaque trou et collez près de son sommet une courte collerette de tourillon plus gros, de façon qu'elle traverse la paroi supérieure du pêne sans aller plus loin : son extrémité doit s'arrêter au ras du plafond de la rainure, sinon la clé n'entrera pas. Élargissez le haut de chaque trou du boîtier pour loger la collerette, puis collez un couvercle sur le bloc afin que les chevilles restent prisonnières.

Faire la clé. Rabotez une barre plate d'environ 10 mm d'épaisseur qui coulisse librement dans la rainure. Collez-y des tourillons aux mêmes intervalles que les trous, hauts chacun de 15 mm, soit exactement l'épaisseur de la paroi supérieure ; barre et dents laissent ainsi 5 mm de jeu sous le plafond quand on glisse la clé. Lorsqu'on soulève la barre de la clé contre le plafond, les dents remplissent les trous et remontent les chevilles juste au-dessus du pêne. Laissez assez de place au-dessus des collerettes pour qu'elles puissent monter d'autant.

Monter et essayer. Les chevilles tombent par gravité : fixez donc le boîtier sur une surface verticale, par exemple l'intérieur d'une porte de placard, chevilles pendantes, et creusez la gâche dans le cadre. Manœuvrez la serrure de

l'intérieur ou découpez à côté une ouverture pour passer la main. Poncez les chevilles jusqu'à ce qu'elles tombent librement et cirez le pêne.

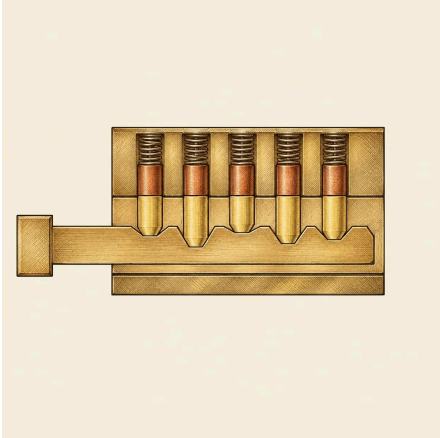
> **Sécurité.** Serrez la pièce dans un serre-joint avant de scier ou de percer, gardez les deux mains derrière le tranchant des ciseaux à bois et portez des lunettes de protection avec une perceuse ou une défonceuse. N'installez jamais une serrure artisanale sur une porte qu'il faut pouvoir ouvrir en urgence, comme une issue de secours ou une salle de bains.

Histoire et évolution

Les serrures sont difficiles à dater, car le bois se conserve mal. L'archéologue français Paul-Émile Botta trouva à Khorsabad, dans le palais du roi assyrien Sargon II, une porte fermée par une grande serrure en bois à chevilles, et Austen Henry Layard rapporta de Ninive une clé de bronze de même forme. On lit souvent que la serrure de Khorsabad aurait 4 000 ans, mais le palais date du VIIIe siècle av. J.-C., et l'archéologue D. T. Potts a montré que ce chiffre venait d'un catalogue mal lu. Il estime aussi que des textes de présages mésopotamiens plus anciens nomment déjà le pêne, les chevilles et la serrure, ce qui rendrait le dispositif plus ancien que tous les exemplaires conservés. Le nom de « serrure égyptienne » vient de son long usage en Égypte, où elle servait encore couramment au XIXe siècle.

Les bagues-clés romaines ouvraient de petits coffrets ; les fentes du panneton laissaient passer les gardes de la serrure.

Les auteurs grecs connaissaient des clés à plusieurs dents, et les forgerons romains firent la serrure en fer et la clé en bronze, ajoutèrent les gardes et fabriquèrent des cadenas. Les petites clés romaines prenaient souvent la forme de bagues, sans doute pour ouvrir des coffrets et des boîtes à bijoux plutôt que des portes ; les vêtements romains n'avaient pas de poches, et une clé portée au doigt restait à la fois sûre et à portée de main. À Colchester, un coffret de bois a été enterré dans une tombe avec sa bague-clé encore engagée dans la serrure. Les serrures médiévales étaient surtout à gardes, souvent très ornées, et un outil fin suffisait à les franchir.



Dans un cylindre à goupilles, la clé amène chaque jonction entre goupilles sur la ligne de cisaillement.

En Angleterre, Robert Barron breveta en 1778 la serrure à gorges à double effet. Joseph Bramah fit breveter en 1784 une serrure cylindrique à lamelles coulissantes, puis promit une récompense à quiconque crochèterait celle de sa vitrine londonienne ; on date souvent ce défi de 1790, mais le panneau conservé au Science Museum porte la date de 1801. Le serrurier américain Alfred Hobbs l'ouvrit pendant l'Exposition universelle de Londres, en 1851, après environ 51 heures de travail réparties sur 16 jours. En 1818, Jeremiah Chubb ajouta un détecteur à la serrure à gorges : un levier soulevé trop haut bloquait le mécanisme et révélait une tentative d'effraction. Abraham Stansbury obtint en Angleterre un brevet de serrure à goupilles en 1805, et Linus Yale père fit breveter ses propres modèles aux États-Unis dans les années 1840. Son fils, Linus Yale, breveta en 1861 une serrure à goupilles à clé ronde, puis en 1865 une serrure ouverte par une clé plate et mince en acier, entaillée sur la tranche. La plupart des cylindres de porte actuels descendent de ce modèle.

Chiffres clés

Plus ancienne serrure de ce type trouvée en place

Palais de Sargon II à Khorsabad, Assyrie, VIIIe siècle av. J.-C.

Serrure de défi de Bramah

Brevetée en 1784, proposée avec une récompense dès 1790 ou 1801 selon les sources, crochetée en 1851 après environ 51 heures de travail

Serrure à détecteur de Chubb

1818

Clé plate à goupilles

Brevetée par Linus Yale fils en 1865

Sources

1. Lock and key in ancient Mesopotamia (D. T. Potts, Mesopotamia 25, 1990) · Università di Torino, Mesopotamia https://www.yeshiva.org.il/midrash/pdf/wiki/potts_1990_-_lock_and_key_in_ancient_mes.pdf
2. Lock and key · Encyclopedia.com (Gale) https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/technology/technology-terms-and-concepts/lock-and-key
3. Ring (Roman bronze key ring, 547-1871) · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O377794/ring/
4. Challenge board for Bramah padlock, 1801 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50474/challenge-board-for-bramah-padlock
5. Improvement in locks, US patent 48,475 (Linus Yale Jr., 1865) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US48475A/en
6. Lock and key · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Lock_and_key
7. An Account of the Manners and Customs of the Modern Egyptians (E. W. Lane, 1836), ch. 1 · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/70796
8. Lock (Encyclopædia Britannica, 11th edition, 1911) · Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/1911_Encyclop%C3%A6dia_Britannica/Lock
9. Working model of Egyptian pin lock (1966-364) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50403/working-model-of-egyptian-pin-lock

Faits vérifiés le 2026-10-12

III

Artisanat & cités

Tour de potier

Façonner l'argile en la faisant tourner

v. 4 000 av. J.-C. · Préhistoire · Artisanat & cités

Nécessite : Céramique (p. 23)

1 Girelle 2 Vase en argile 3 Arbre vertical 4 Palier à collier 5 Volant 6 Crapaudine

Le tour de potier est un disque lourd qui tourne sur un axe vertical, si bien que l'argile posée en son centre peut être façonnée régulièrement tout autour par les mains du potier. Il est né au Proche-Orient sous la forme d'une tournette lente il y a plus de six mille ans ; le tour rapide, qui garde assez d'élan pour tourner un vase à partir d'une motte d'argile, est venu ensuite.

Ce que c'est

Le tour de potier est un plateau rond et plat, la girelle, monté sur un arbre vertical qui tourne librement. Le potier pose une motte d'argile humide au centre, la fait tourner et la presse des mains mouillées ou d'un outil. Comme chaque point de l'argile passe tour à tour sous les mains, une seule pression régulière façonne d'un coup toute la circonférence.

Il en existe deux sortes. Le tour lent, ou tournette, se pousse à la main par petits coups. Il aide le potier à régulariser un vase monté au colombin et à en finir le bord. Le tour rapide continue de tourner seul parce qu'il est lourd, et il va assez vite pour tourner un vase : le monter en quelques minutes à partir d'une motte pleine, avec la seule rotation et les mains du potier.

Les deux catégories se recoupent, et les archéologues distinguent aujourd'hui la machine de la technique de façonnage employée dessus. La planche montre un tour à pied, tour rapide entraîné du pied, d'un type employé dans les ateliers européens avant les moteurs électriques.

Comment ça marche

Le tour à pied n'a qu'un arbre vertical, le plus souvent en fer. En haut, il porte la girelle, à hauteur de taille pour un potier assis. Près du sol, il porte le volant, un disque épais et lourd en bois, en pierre ou en béton. L'arbre tourne dans deux paliers : un collier juste sous la girelle, qui le maintient droit, et une crapaudine en bas, où son extrémité pointue ou arrondie tourne dans une cupule et porte tout le poids.

Le potier s'assoit sur un banc derrière le tour et pousse le volant d'un pied. Un volant lourd demande plusieurs coups de pied pour se lancer, mais une fois en rotation il emmagasine de l'énergie et continue de tourner pendant que les mains travaillent. Plus il est lourd, et plus son poids est reporté vers le bord, plus il garde longtemps sa vitesse. La plupart des potiers font tourner le tour dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ; au Japon, la tradition est le sens horaire.

Le tournage suit un ordre fixe. D'abord, on centre l'argile : on la presse des deux mains jusqu'à ce qu'elle tourne rond et ne voile plus. Le potier l'ouvre ensuite en enfonçant les pouces au milieu, laisse un fond et écarte l'argile en un anneau épais. En tirant vers le haut, une main dedans et une main dehors, il monte la paroi, plus mince et plus haute à chaque passe. Enfin il renfle ou resserre la forme, lisse le bord et détache le vase de la girelle avec un fil. Mains et argile restent mouillées tout du long, et une estèque de bois tenue contre la paroi en rotation la lisse et enlève l'eau en trop.

Les étapes du tournage : centrer, ouvrir, monter un cylindre et donner la forme.

Les outils du tourneur : une estèque pour lisser la paroi, un fil pour détacher le vase, une éponge, une pointe et une mirette pour tournasser.

L'argile garde la trace de la façon dont un vase a été fait. Les cannelures et les marques laissées par les doigts et les outils sur les parois intérieure et extérieure, et la façon dont l'argile est feuilletée à l'intérieur, permettent aux archéologues de distinguer un vase tourné à partir d'une motte sur un tour rapide d'un vase monté au colombin puis seulement façonné sur un tour. Beaucoup des premiers vases « au tour » se révèlent être de la seconde sorte, ce qui permet de suivre la lente diffusion du tournage. Les outils laissent eux aussi leur marque : l'estèque laisse une bande lisse, et un fil passé sous un vase encore en rotation laisse sur le fond un motif courbe en coquille.

Comment le construire

Un tour à pied se construit à l'atelier avec du bois, un arbre en acier, deux paliers et un volant coulé soi-même. Le plan de Mother Earth News cité dans les sources utilise un bâti d'environ 75 cm (30 pouces) de côté, qui porte aussi le siège. Le volant fini pèse environ 60 à 75 kg : choisissez paliers, moyeu et fixations prévus pour cette charge, ou suivez un plan complet publié.

Monter le bâti. Boulonnez un bâti en forme de cube, avec des montants de 10 × 10 cm et des traverses de 5 × 10 cm, une traverse juste sous le haut pour le palier supérieur et une traverse solide en bas pour le palier inférieur.

Fixez une planche de siège à l'arrière et un repose-pied à hauteur de genou environ, du côté où l'on pousse.

Poser l'arbre et les paliers. Prenez un arbre en acier bien droit d'environ 25 mm de diamètre. Boulonnez un palier à bride à plat sur la traverse basse pour porter le poids, et un second palier à bride à plat sous un support de la traverse haute pour tenir l'arbre droit ; bloquez-les tous deux sur l'arbre avec leurs vis de pression. Les roulements étanches à rotule sont les plus simples. Vérifiez au fil à plomb que l'arbre est parfaitement vertical et qu'il tourne sans toucher le bois.

Couler le volant. Découpez un disque de contreplaqué d'environ 60 cm percé exactement en son centre, enfilez-y l'arbre et boulonnez au contreplaqué un moyeu ou un collier d'acier fixé sur l'arbre. Entourez le disque d'une bande de carton bitumé ou de tôle pour former un moule de 15 à 18 cm de haut, fixez à travers le contreplaqué des boulons qui dépassent dans le moule, et coulez 10 à 12 cm de béton, qui prendra autour du moyeu. Attendez au moins deux jours avant de le déplacer, gardez-le humide pendant la cure, et ne le faites pas tourner avant que le béton ait atteint la résistance que son fabricant indique pour une mise en charge.

Monter la girelle. Placez l'arbre et son volant dans les paliers et fixez en haut une girelle de bois ou de métal de 25 à 30 cm. Faites tourner à la main et corrigez tout voile avant de mettre de l'argile.

> **Sécurité.** Le volant est lourd et tourne longtemps : gardez doigts, pieds et vêtements amples hors de l'espace entre volant et bâti, et ne l'arrêtez jamais en saisissant le bord. Ne montez jamais et ne vous tenez jamais debout sur le volant, ce qui peut abîmer sa fixation. Portez lunettes et gants pour gâcher le béton, qui est caustique. La poussière d'argile contient de la silice : nettoyez le tour et le sol à l'humide, jamais au balai à sec.

Histoire et évolution

Pendant des milliers d'années, on a fait les pots à la main avant l'invention du tour. Parmi les plus anciens dispositifs rotatifs pour la poterie bien étudiés figurent ceux du Levant sud, dans la seconde moitié du Ve millénaire av. J.-C. ; des tours plus anciens ailleurs restent discutés. Les recherches de Valentine Roux et de ses collègues montrent que les potiers y montaient leurs vases au colombin puis les façonnaient sur le tour, et que ce travail était réservé à quelques spécialistes, pour des bols fins au statut particulier. Selon cette lecture, le tour s'est d'abord diffusé pour le prestige plus que pour la vitesse.

Une tournette de pierre en deux parties : le disque supérieur tourne sur son pivot, logé dans la cavité de la pierre inférieure.

À l'époque d'Uruk en Mésopotamie, vers 3400 av. J.-C., le tour rapide était en usage, et un tour de potier trouvé à Ur a été daté d'environ 3100 av. J.-C. La technique atteignit l'Égée au IIIe millénaire av. J.-C., sans qu'on sache bien si elle passa par la Crète, et la Grande-Bretagne seulement au Ier siècle av. J.-C. Dans les Amériques, les potiers produisirent des céramiques fines sans aucun tour jusqu'au contact avec les Européens. Le mythe égyptien montre le dieu Khnoum façonnant les premiers humains sur un tour de potier.

On ignore quand est apparu le tour à pied, avec son long arbre et son volant poussé du pied ; certains tours anciens se tournaient à la main ou avec un bâton. Des tours plus tardifs utilisèrent une pédale et une manivelle pour changer le mouvement de va-et-vient de la jambe en rotation, et des moteurs électriques entraînent aujourd'hui bien des tours.

Chiffres clés

Premières poteries façonnées au tour
Levant sud, seconde moitié du Ve millénaire av. J.-C.

Tour rapide en Mésopotamie
En usage à l'époque d'Uruk, vers 3400 av. J.-C.

Tour de potier d'Ur
Daté d'environ 3100 av. J.-C.

Arrivée en Grande-Bretagne
Ier siècle av. J.-C.

Sources

1. Unveiling the sign value of early potter's wheels based on a 3-D morphometric analysis of Late Chalcolithic vessels from the southern Levant (Roux and Harush, 2022) · Bar-Ilan University research portal (Journal of Archaeological Science: Reports) https://cris.biu.ac.il/en/publications/unveiling-the-sign-value-of-early-potters-wheels-based-on-a-3-d-m/
2. Potter's wheel · Buckinghamshire Council Heritage Portal https://heritageportal.buckinghamshire.gov.uk/theme/tbc463
3. Pottery kick wheel plans · Mother Earth News https://www.motherearthnews.com/diy/pottery-kick-wheel-plans-zmaz70ndzgoe/
4. Potter's wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Potter%27s_wheel
5. A preliminary study of rotation velocity regulation in pottery wheel-throwing: fieldwork with Indian potters using the low-inertia kick-wheel (Gandon et al., 2021) · HAL open archive (Journal of Archaeological Science: Reports) https://amu.hal.science/hal-03475151
6. The Ancient Greek potter’s wheel: experimental archaeology and web applications for velocity analysis (Neth and Hasaki, 2021) · Interdisciplinaria Archaeologica https://iansa.eu/papers/IANSA-2021-02-neth.pdf
7. Ceramics Unit 8: Wheel Throwing · Colorado State University Extension (4-H) https://co4h.colostate.edu/wp-content/uploads/sites/27/2026/03/Ceramics-Unit-8-Wheel-Throwing.pdf
8. Weights of clay needed for ware sizes · Lakeside Pottery https://www.lakesidepottery.com/HTML%20Text/Tips/weights-of-clay-needed-for-ware-size.pdf
9. Water of plasticity · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/test/wopl

Faits vérifiés le 2026-10-12

Bronze

Cuivre et étain, plus durs ensemble

v. 3 300 av. J.-C. · Préhistoire · Artisanat & cités

Nécessite : Céramique (p. 23), Maîtrise du feu (p. 9), Charbon de bois (p. 65)

Mène à : Pile électrique (p. 242), Engrenages (p. 155), Métallurgie du fer (p. 138), Pompe à piston (p. 163)

1 Creuset de bronze en fusion 2 Soufflet à pot 3 Tuyère d'argile 4 Moule extérieur en argile 5 Noyau d'argile 6 Entonnoir et canal de coulée

Le bronze est du cuivre allié à un peu d'étain, en général un dixième. Plus dur que le cuivre, il fond à plus basse température et remplit bien un moule ; à partir du IVe millénaire av. J.-C., il a donné son nom à un âge d'outils, d'armes, de vases et de statues.

Ce que c'est

Le bronze est un alliage, un métal composé de deux éléments ou plus, ici surtout du cuivre avec une part plus faible d'étain ; la recette classique compte environ neuf parts de cuivre pour une d'étain, en poids. Les objets anciens conservés contiennent de deux tiers à 95 % de cuivre environ, avec parfois d'autres métaux comme l'arsenic, le plomb ou le zinc.

L'étain durcit le cuivre, et une lame garde mieux son tranchant. Le bronze fond sur une plage de températures autour de 950 °C, selon la teneur en étain, alors que le cuivre pur fond à 1 085 °C ; cette température plus basse est plus facile à atteindre avec un feu de charbon de bois soufflé. Le bronze fondu coule aussi bien dans un moule.

Comment ça marche

Le cuivre pur est fait de cristaux dont les plans d'atomes glissent facilement les uns sur les autres : c'est pourquoi il plie et se bosselle. Les atomes d'étain sont plus gros. Dispersés dans le cuivre, ils bloquent ces plans, si bien que le métal résiste mieux à la flexion et aux chocs. Le martelage à froid le durcit encore : une lame de bronze pouvait être coulée, puis battue sur le fil pour le durcir.

La teneur en étain décide de l'usage du métal. Le bronze à 10 % d'étain environ était la norme pour couler outils et armes ; un bronze plus doux, à 6 %, se martelait en tôle. Le bronze de cloche dépasse 20 % d'étain : il est dur et sonne bien, mais se brise s'il tombe. Trop d'étain rend n'importe quel bronze cassant.

Les matières premières du commerce de l'âge du bronze : un lingot de cuivre « en peau de bœuf » à quatre poignées et des morceaux d'étain.

Les minerais de cuivre et d'étain se trouvent rarement au même endroit. Le cuivre s'extrayait dans bien des régions, Chypre parmi les plus riches ; l'étain venait de lieux beaucoup moins nombreux, comme la Cornouailles, le Taurus et l'Afghanistan ou ses voisins. Le bronze dépendait donc de longues routes commerciales, et une rupture de l'approvisionnement en étain pouvait arrêter la production très loin de là.

Un moule de pierre en deux parties : une fois refermées, les deux moitiés forment la hache, et le métal est versé par le bout étroit.

Les formes simples, comme les haches plates, se coulaient dans des moules ouverts ou dans des moules en deux parties, en pierre ou en argile. Les objets creux ou très détaillés pouvaient être faits par la fonte à la cire perdue. Le fondeur modelait l'objet en cire autour d'un noyau d'argile, ajoutait des tiges de cire qui deviendraient le canal de coulée, et enveloppait le tout d'argile fine. En cuisant le moule, on faisait fondre la cire. Le bronze versé dans le moule chaud remplissait la place laissée par la cire, et l'on cassait le moule une fois le métal refroidi. Les fonderies d'art procèdent encore ainsi : elles coulent le bronze bien au-delà de 1 000 °C dans un moule chauffé au préalable à plusieurs centaines de degrés, pour qu'il ne se fende pas.

Comment le fabriquer

Couler du bronze, c'est manipuler un métal à plus de 1 000 °C. Apprenez-le dans un stage de fonderie ou l'atelier d'une école, auprès d'un fondeur expérimenté, avant de le tenter ailleurs. Les étapes ci-dessous décrivent une petite fonte à la cire perdue.

Faire le modèle. Modelez un petit objet en cire de fonderie, plein et nulle part plus épais qu'un doigt. Fixez une tige et un godet de cire sur la partie la plus épaisse : ils formeront le canal de coulée.

L'envelopper. Fixez le godet de cire sur un socle de coulée en caoutchouc, posez un cylindre d'acier par-dessus et remplissez-le d'un revêtement vendu pour la fonte du bronze, mélange de plâtre et de silice ; une fois le socle retiré, le godet forme l'ouverture de coulée. Suivez exactement les instructions du fabricant pour le gâchage, la prise et le séchage : chaque produit a les siennes.

Décirer. Chauffez le moule à l'envers dans un four en suivant le cycle de cuisson prévu pour le revêtement, pour que la cire s'écoule et que le moule soit parfaitement sec. Coulez pendant qu'il est encore chaud : un moule froid

ou humide peut se fendre ou rejeter le métal.

Fondre le métal. Utilisez du bronze de fonderie tout prêt (cuivre à environ 10 % d'étain) ou pesez du cuivre et de l'étain propres dans le rapport 9 pour 1. Faites fondre dans un creuset argile-graphite, dans un four à air soufflé ; si vous faites l'alliage vous-même, ajoutez l'étain en dernier, puis écumez les crasses.

Couler et finir. Soulevez le creuset avec des pinces adaptées et versez d'un jet régulier jusqu'à remplir le godet. Laissez refroidir, cassez le moule, coupez le canal, puis limez, ciselez et polissez la surface.

> **Sécurité.** Le métal en fusion provoque des brûlures graves et des incendies. Portez des vêtements conçus contre les projections de métal en fusion, une visière par-dessus des lunettes de sécurité, des gants et des bottes de fonderie, le pantalon par-dessus les bottes pour que le métal ne puisse pas y couler, et tenez les curieux à distance. Outils, moules et lingots doivent être parfaitement secs : une goutte d'eau sous du métal en fusion se change en vapeur et le projette. Coulez au-dessus de sable sec, jamais sur du béton, et travaillez dehors ou sous une aspiration puissante. Ne fondez jamais de déchets de composition inconnue : le laiton dégage des fumées de zinc, et certains vieux alliages contiennent du plomb ou d'autres métaux toxiques. Le revêtement et les moules cassés libèrent de la poussière de silice : gâchez-les et décochez-les à l'humide ou sous aspiration, et portez un appareil respiratoire certifié et bien ajusté contre les poussières fines de silice.

Histoire et évolution

Du cuivre allié à l'arsenic était produit sur le plateau iranien, sur des sites comme Tal-i Iblis, vers 3800 à 3400 av. J.-C. Le cuivre arsénié est dur, mais ses fumées sont toxiques. Le plus ancien bronze à l'étain connu à ce jour est une feuille de Pločnik, en Serbie, que ses fouilleurs datent d'environ 4650 av. J.-C., bien que le contexte de la découverte ait été contesté ; il a sans doute été obtenu à partir d'un minerai qui contenait déjà les deux métaux. Au Proche-Orient, on fait commencer l'âge du bronze au milieu du IVe millénaire av. J.-C., d'abord surtout avec du cuivre arsénié ; le bronze à l'étain y devient l'alliage courant au IIIe millénaire. En Chine, l'âge du bronze débute au début du IIe millénaire av. J.-C.

Un chaudron rituel shang de type ding. Les fondeurs chinois coulaient ces vases dans des moules assemblés à partir de nombreuses pièces d'argile.

L'épave d'Uluburun, qui a sombré au large du sud de la Turquie vers 1300 av. J.-C., montre l'ampleur de ce commerce. Sa cale contenait environ 10 tonnes de cuivre chypriote, dont quelque 350 lingots en peau de bœuf, et environ une tonne d'étain, à peu près la proportion de dix pour un du bronze. En Chine, les cours shang et zhou faisaient couler des vases rituels pour les offrandes et les tombes, selon une méthode de moules à pièces sans équivalent ailleurs.

Vers 1200 av. J.-C., guerres et migrations autour de la Méditerranée orientale coupèrent bien des routes commerciales ; une explication veut que l'étain se soit raréfié, mais les indices varient selon les régions. Le fer, dont le minerai se trouve presque partout, remplaça peu à peu le bronze pour les outils et les armes, à mesure que les forgerons apprirent à le travailler. Le bronze resta en usage pour les cloches, les statues, les miroirs, les monnaies et les ferrures de navire, et aujourd'hui pour les coussinets, les ressorts et les pièces marines qui doivent résister à l'eau de mer.

Chiffres clés

Alliage classique
Environ 9 parts de cuivre pour 1 d'étain

Fusion
Sur une plage autour de 950 °C, selon l'étain (cuivre pur : 1 085 °C)

Plus ancien bronze à l'étain connu
Une feuille de Pločnik (Serbie), datée vers 4650 av. J.-C. (discuté)

Cargaison d'Uluburun, vers 1300 av. J.-C.
Environ 10 t de cuivre et 1 t d'étain

Sources

1. Tainted ores and the rise of tin bronzes in Eurasia, c. 6500 years ago (Radivojević et al., Antiquity, 2013) · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/tainted-ores-and-the-rise-of-tin-bronzes-in-eurasia-c-6500-years-ago/496710374082FC211C512670F0A98004
2. Uluburun Shipwreck · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/Uluburun_Shipwreck/
3. Metalworking techniques · Victoria and Albert Museum https://www.vam.ac.uk/articles/metalworking-techniques
4. Rodin's lost-wax casting process · North Carolina Museum of Art https://learn.ncartmuseum.org/resources/rodins-lost-wax-casting-process/
5. Jue (ritual wine vessel), Late Shang dynasty · University of Arkansas Museum https://scholarworks.uark.edu/uamumaa/2
6. Bronze · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bronze
7. Cu-Sn system: calculated phase diagram and invariant reactions (after Shim, Oh, Lee and Lee, 1996) · National Institute of Standards and Technology https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html
8. C90700 tin bronze: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C90700.pdf
9. C91100 tin bronze: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C91100.pdf
10. C91300 bell metal: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C91300.pdf
11. Experimental design of the Cu-As-Sn ternary colour diagram (Radivojević et al., 2018) · Journal of Archaeological Science 90 https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.12.001
12. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas (Lechtman, 1996) · Journal of Field Archaeology 23 https://doi.org/10.1179/009346996791973774
13. From the object to the mould: is there a connection between microstructure of a cast bronze object and its mould material used? (Jochum Zimmermann, Künzler Wagner and Osimitz, 2012) · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10076
14. Castability control in metal casting via fluidity measures (Dewhirst, PhD thesis, 2008) · Worcester Polytechnic Institute https://web.wpi.edu/Images/CMS/A_2.pdf
15. Effect of composition and pouring temperature of Cu-Sn on fluidity and mechanical properties of investment casting (Slamet et al., 2024) · Archives of Foundry Engineering 24(3) https://doi.org/10.24425/afe.2024.151290

Faits vérifiés le 2026-10-12

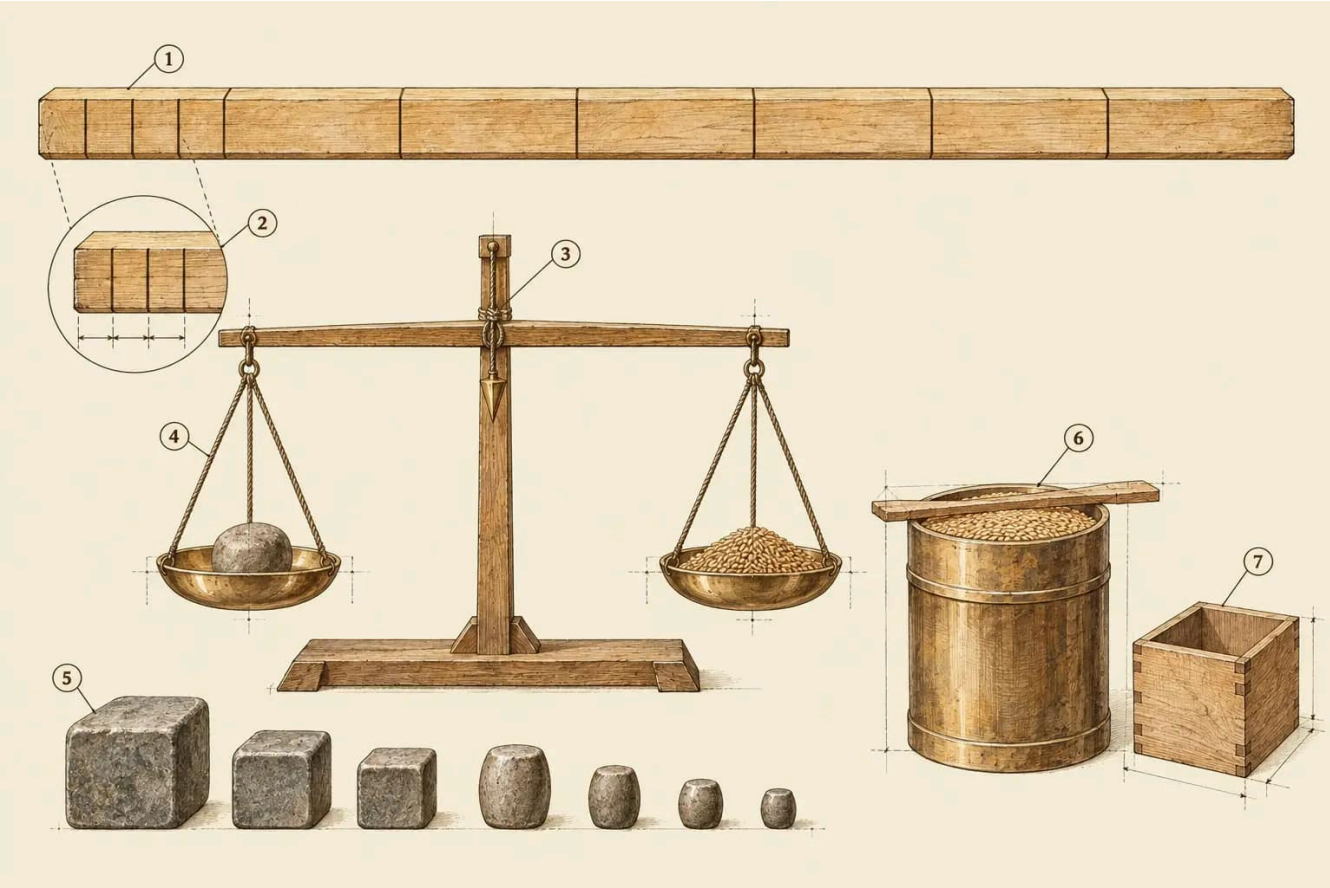
Mesures et étalons

La coudée, la balance et le mètre

v. 3 000 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Outils de pierre (p. 5), Corde & cordage (p. 13), Céramique (p. 23)

Mène à : Aqueduc (p. 147), Navigation astronomique (p. 212), Réhydratation orale (p. 377), Ciment Portland (p. 259), Thermomètre et baromètre (p. 224)



1 Règle-coudée, l'étalon de longueur 2 Première paume divisée en quatre doigts 3 Fléau suspendu en son milieu exact, avec aiguille 4 Plateau suspendu à des cordes 5 Jeu de poids en pierre 6 Mesure à grain et sa racloire 7 Cube tiré de l'unité de la règle

Une mesure est une longueur, un poids ou un volume convenus à l'avance, et un étalon est l'objet qui la conserve : une règle, un jeu de pierres ou un récipient, gardé en lieu sûr et copié. L'Égypte comptait en coudées, paumes et doigts, les poids de balance se sont répandus depuis la Mésopotamie à partir de 3000 av. J.-C. environ, et ce même travail de garde et de copie a conduit au mètre et au kilogramme.

Ce que c'est

Une mesure permet de comparer des choses qui ne sont pas côte à côte : des poutres commandées dans une forêt lointaine, du grain vendu au volume, du cuivre vendu au poids. Les unités sont arbitraires. Ce qui compte, c'est que toutes les copies s'accordent entre elles.

Un étalon est l'objet qui fixe une unité : une règle, un poids, un récipient. Une autorité le garde, et l'on vérifie sur lui les copies d'usage. La planche montre les outils de base tels qu'un artisan pourrait les refaire : une règle-coudée,

une balance à bras égaux avec ses poids de pierre, une mesure à grain et une boîte qui transforme une longueur en volume.

Comment ça marche

La longueur. Les plus anciennes unités viennent du corps : l'avant-bras, la paume, le doigt, le pied. Comme les corps diffèrent, une règle fixe la longueur choisie. La coudée royale égyptienne comptait 7 paumes de 4 doigts, soit 28 doigts, et les règles conservées mesurent environ 52 à 53 cm. Kha, chef des travaux enterré à Deir el-Medina, avait reçu du roi une coudée dorée, mais travaillait sans doute avec une coudée pliante trouvée dans la même tombe. Deux règles se comparent sans chiffres, posées l'une contre l'autre, extrémités alignées.

Le poids. Une balance à bras égaux compare deux charges. Le fléau est suspendu en son milieu et les plateaux pendent à égale distance de part et d'autre : il ne reste horizontal que si les deux plateaux portent le même poids. Les poids sont des morceaux de pierre dure ou de métal, usés à la meule jusqu'à équilibrer une référence, souvent aplatis dessous pour ne pas rouler.

Dans les villes de l'Indus, au IIIe millénaire av. J.-C., les poids étaient surtout des cubes de chert. Une étude de ceux de Mohenjo-daro, publiée en 1938, a trouvé une unité d'environ 0,86 g et des poids de 1, 2, 4, 8, 16, 32 et 64 unités, puis des paliers plus grands comme 160, 200, 320 et 640. Les plus courants valaient 16 et 32 unités, soit environ 13,7 et 27,4 g. Dans plusieurs tailles usuelles, l'écart moyen à la valeur moyenne n'était que de 1 à 2 %.

Les poids de l'Indus étaient des cubes de chert rubané ; dans les petites tailles, chacun pesait environ la moitié du précédent.

Le volume. Le grain, l'huile et le vin se vendaient dans des récipients de contenance convenue, et l'on arasait les grains avec une baguette droite, la racloire. Un volume peut aussi découler d'une longueur : l'amphore romaine servant d'unité valait un pied cube, et le premier kilogramme était la masse d'un décimètre cube d'eau.

Comment le fabriquer

Il faut une barre de bois dur bien sec et droit d'environ 60 cm, une seconde barre pour le fléau, de la ficelle solide, deux bols identiques, des pierres dures à grain fin, des limes, une pierre à meuler plate, un couteau à tracer, un compas à pointes sèches et quelques planchettes.

Choisir et copier l'étalon. N'importe quelle longueur peut servir d'unité : un avant-bras ou un mètre de menuisier. Tracez deux traits fins en travers de la règle, à ses extrémités : un trait dure plus longtemps qu'une face d'about, qui s'use. Gardez cet étalon au sec et ne vous en servez que pour vérifier les copies. Pour le copier, posez contre lui une règle vierge, reportez chaque trait au couteau, puis retournez la copie bout pour bout, alignez son premier trait sur celui de l'étalon et comparez les autres : un trait qui ne coïncide plus signale une erreur.

Diviser sans calcul. Pour 7 paumes, ouvrez le compas au jugé et reportez-le sept fois le long de la règle. Si le dernier pas manque le trait d'extrémité, corrigez l'ouverture et recommencez jusqu'à tomber dessus. Divisez une paume en 4 doigts de la même façon.

Faire la balance. Suspendez le fléau par une cordelette ou une goupille au milieu de son bord supérieur : l'essentiel de sa masse se trouve sous le pivot et il revient de lui-même à l'horizontale. Accrochez les plateaux à des encoches équidistantes du centre, fixez une aiguille et grattez le bout le plus lourd jusqu'à ce que le fléau vide soit horizontal.

La vérifier en échangeant les charges. Équilibrez une pierre avec du sable, puis échangez la pierre et le sable. Si le fléau reste horizontal, les bras sont égaux. Sinon, déplacez légèrement une encoche, remettez le fléau vide à l'horizontale et refaites l'essai. Ajoutez ensuite de petits objets dans un plateau et notez le plus petit qui fait bouger l'aiguille : les poids vérifiés sur cette balance ne seront pas plus justes que cela.

Tirer des poids d'une référence. Même une balance imparfaite copie un poids par substitution : équilibrez la référence avec du sable, retirez-la, et meulez une nouvelle pierre jusqu'à ce qu'elle équilibre le même sable. Pour une série où chaque poids vaut le double du précédent, meulez une pierre qui équilibre deux unités ensemble, puis une qui équilibre cette pierre et les deux unités réunies, et ainsi de suite. Comparez les gros poids à la somme des petits, car les erreurs s'additionnent.

Tirer un volume de la règle. Construisez une boîte ouverte dont la longueur, la largeur et la profondeur intérieures valent chacune une paume. Son contenu d'eau peut marquer un niveau sur un récipient, ou être pesé pour relier un poids à votre longueur ; la définition du premier kilogramme précisait aussi la température de l'eau. Pour le grain, versez sans tasser ni secouer, et arasez à la racloire.

> **Sécurité.** Meuler la pierre produit une poussière fine qui peut contenir de la silice : travaillez à l'eau, portez des lunettes et un masque FFP2 ou FFP3, et nettoyez à l'eau plutôt qu'au balai. Bridez la pièce quand vous tracez au couteau. Ne fabriquez pas de poids en plomb. Des mesures faites maison n'ont pas de valeur légale : dans la plupart des pays, vendre au poids ou au volume exige des instruments vérifiés.

Histoire et évolution

Les poids de balance apparaissent en Mésopotamie et en Égypte vers le début du IIIe millénaire av. J.-C. Les textes mésopotamiens définissent le sicle, environ 8,4 g, comme 180 grains d'orge, et bien des poids sont des pierres polies, parfois sculptées en canard ou en lion. Une équipe de l'université de Göttingen a comparé 2 274 poids issus de 127 sites datés d'environ 3000 à 1000 av. J.-C. Des unités voisines se sont diffusées de la Mésopotamie jusqu'à l'Europe, tandis que l'Indus avait son propre système. Autour de la moyenne de chaque unité, les poids se dispersent avec un coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne) d'environ 5 à 6 %. Quand l'équipe a fabriqué 100 copies sur des répliques de balances, chacune d'après un modèle tiré au hasard, elles se sont dispersées à peu près autant, 5,4 %, et les auteurs estiment que les marchands maintenaient les unités d'accord en comparant leurs poids entre eux, sans autorité centrale.

Une table de mesures publique : l'acheteur remplissait une cavité, puis la vidait par le trou du fond.

Les villes gardaient pourtant des références officielles. À Pompéi, une table de pierre du forum portait des cavités aux mesures osques locales ; après l'unification des mesures romaines sous Auguste, le conseil les fit agrandir et creuser quatre de plus. En Angleterre, Henri VII fit faire en 1495–1497 un yard étalon en bronze et en envoya des copies aux bourgs ; jugé imprécis, il fut remplacé vers 1588.

En 1791, l'Académie des sciences proposa un mètre égal au dix-millionième de la distance du pôle à l'équateur, et des géomètres mesurèrent le méridien de Dunkerque à Barcelone. En 1799, un mètre en platine, défini par ses faces d'extrémité, et un kilogramme égal à un décimètre cube d'eau furent déposés aux Archives. La barre devint bientôt l'unité à elle seule.

En 1875, dix-sept pays signèrent la Convention du mètre, qui créa le Bureau international des poids et mesures, près de Paris. À partir de 1889, le mètre fut la distance entre deux traits d'une barre de platine iridié en X, à 0 °C, et

le kilogramme la masse d’un cylindre du même alliage, dont des copies furent remises aux États membres. Des vérifications ultérieures montrèrent que les copies s’écartaient lentement de l’original, d’environ 25 microgrammes en valeur médiane en 1989–1991. Le mètre fut redéfini par la lumière du krypton en 1960, puis par la vitesse de la lumière en 1983. Depuis le 20 mai 2019, le kilogramme repose sur la constante de Planck.

Le kilogramme international était gardé sous des cloches de verre ; le mètre de 1889 était une barre à section en X.

Chiffres clés

Coudée royale égyptienne

7 paumes de 4 doigts, soit 28 doigts ; les règles conservées mesurent environ 52 à 53 cm

Poids de l'âge du bronze comparés

2 274 poids provenant de 127 sites, vers 3000–1000 av. J.-C.

Kilogramme

Un cylindre de platine iridié de 1889 ; défini par la constante de Planck depuis le 20 mai 2019

Poids de l'Indus (Mohenjo-daro)

Unité d'environ 0,86 g ; les poids les plus courants valent 16 et 32 unités, environ 13,7 et 27,4 g

Premiers mètre et kilogramme

Étalons en platine déposés aux Archives en 1799

Sources

1. Royal cubit rod inscribed with the name of pharaoh Amenhotep II (Suppl. 8647) · Museo Egizio, Turin https://collezioni.museoegizio.it/en-GB/material/S_8647
2. Cubit rod (Liverpool M13825) · Global Egyptian Museum / World Museum Liverpool https://globalegyptianmuseum.org/detail.aspx?id=4424
3. System of weights (A. S. Hemmy), in E. J. H. Mackay, Further Excavations at Mohenjo-daro (1938) · Archaeological Survey of India https://richardsproat.com/indus_weights/Hemmy-1938-weights-Mohenjodaro-Mackay.pdf
4. Hanging in the Balance: Precision Weighing in Antiquity (William B. Hafford, Expedition 47.2, 2005) · Penn Museum https://www.penn.museum/sites/expedition?p=9719
5. Bronze Age: how the market began (press release, 29 June 2021) · University of Göttingen https://www.uni-goettingen.de/en/73613.html?id=6309
6. Bronze Age weight systems as a measure of market integration in Western Eurasia (Ialongo, Hermann and Rahmstorf, PNAS 118, 2021) · Proceedings of the National Academy of Sciences https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8271817/
7. Bronze Age Merchants Developed Measurement System · Archaeology Magazine https://archaeology.org/news/2021/06/30/210701-bronze-age-weights/
8. Roman Weights and Measures · University of Kent https://blogs.kent.ac.uk/lucius-romans/2017/12/13/roman-weights-and-measures/
9. VII.7.31 Pompeii, Mensa Ponderaria · Pompeii in Pictures https://pompeiiinpictures.com/pompeiiinpictures/R7/7%2007%2031.htm
10. Cooking the volumes (Amelia Carolina Sparavigna, 2012) · arXiv, Politecnico di Torino https://arxiv.org/abs/1201.3774
11. Exchequer standard yard of King Henry VII, 1495-1497 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co57527/exchequer-standard-yard-of-king-henry-vii-1495-1497-rules-measuring-devices-linear-standards
12. Time Line for the Definition of the Meter (William B. Penzes) · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/document/museum-timelinepdf
13. Defining the International System of Units (SI) · NIST Museum https://www.nist.gov/nist-museum/defining-international-system-units-si
14. Historical perspective: Unit of mass, kilogram · Bureau International des Poids et Mesures https://www.bipm.org/en/history-si/kilogram
15. Historical perspective: Unit of length, metre · Bureau International des Poids et Mesures https://www.bipm.org/en/history-si/metre
16. The evolution of the metre · Physics World https://physicsworld.com/a/the-evolution-of-the-metre-how-a-product-of-the-french-revolution-became-a-mainstay-of-worldwide-scientific-collaboration/
17. SM052 Analytical balance, circa 1962 · University of Malta Science Museum https://staff.um.edu.mt/rlib1/sm/balance.htm
18. Site 1149, table T17: physical properties by lithology (ODP Leg 185 Initial Reports) · Ocean Drilling Program, Texas A&M University https://www.iodp.tamu.edu/publications/185_IR/chap_04/c4_t17.htm

Faits vérifiés le 2026-10-13

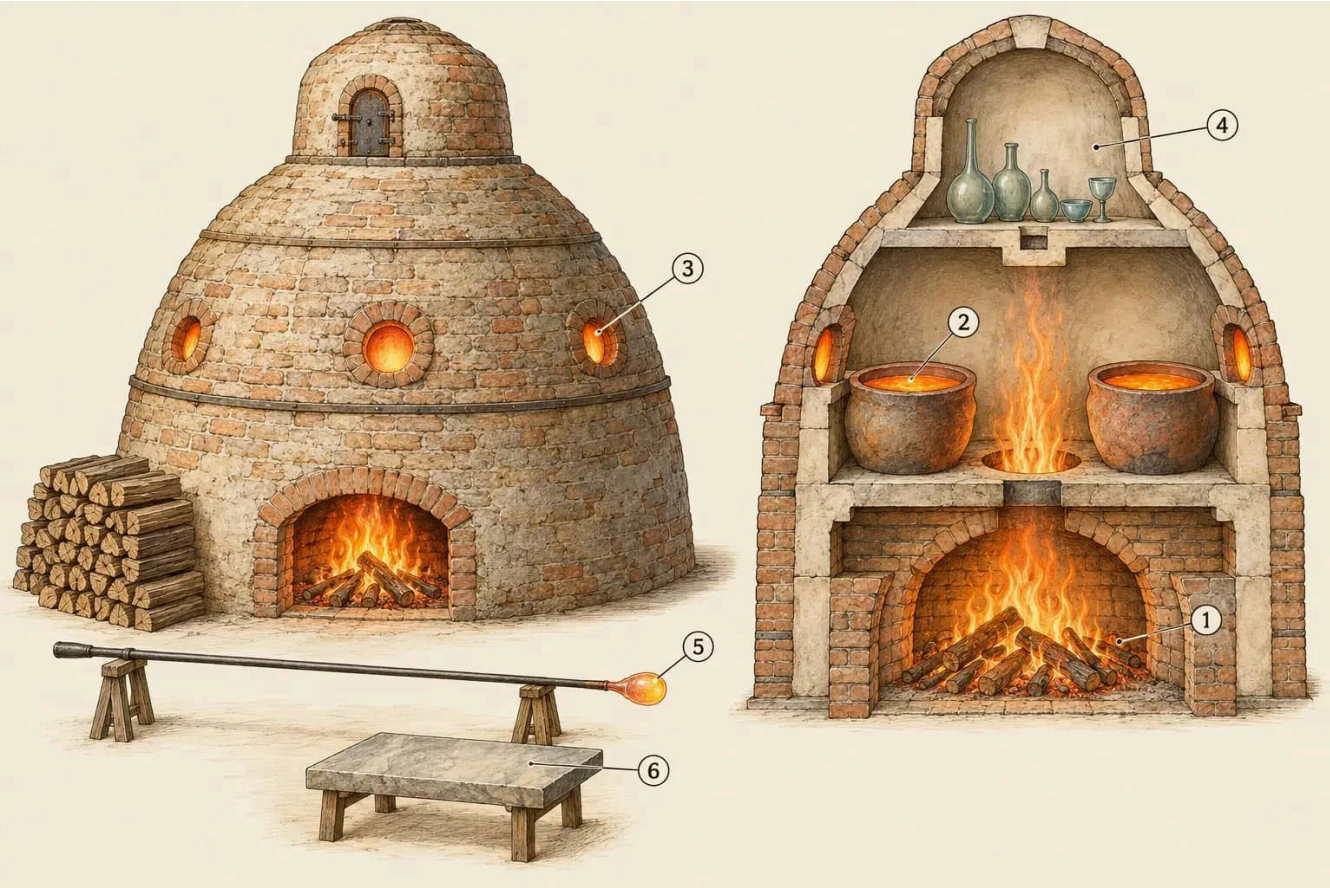
Verre

Du sable fondu transparent

v. 2 500 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Céramique (p. 23)

Mène à : Anesthésie (p. 296), Conserves & pasteurisation (p. 250), Lunettes de vue (p. 199), Ampoule à incandescence (p. 324), Pénicilline (p. 359), Photographie (p. 263), Cellule solaire (p. 372), Thermomètre et baromètre (p. 224), Vaccination (p. 237)



1 Chambre de chauffe 2 Creuset de verre en fusion 3 Ouvreau 4 Chambre de recuisson 5 Canne avec une paraison de verre 6 Marbre

Le verre est du sable fondu avec un fondant comme la soude et un peu de chaux, puis refroidi avant d'avoir pu cristalliser : il devient un solide dur qui, pur, laisse passer la lumière. D'abord façonné en perles en Mésopotamie, il est devenu un matériau courant quand les verriers de Méditerranée orientale ont appris à le souffler au bout d'une canne, au Ier siècle av. J.-C.

Ce que c’est

Le verre est un solide sans cristaux. Quand on fond du sable avec les bons ajouts et que le liquide refroidit assez vite, ses atomes n’ont pas le temps de s’ordonner en réseau régulier. Ils se figent dans un réseau désordonné : c’est pourquoi le verre est dur et cassant, et pourquoi il ramollit peu à peu à la chaleur au lieu de fondre à une température précise. Le verre clair laisse passer la lumière parce que ses composants absorbent peu la lumière visible et qu’une bonne fonte ne contient ni bulles ni cristaux pour la diffuser.

Le verre ordinaire, ancien comme moderne, est un verre sodocalcique. Le sable siliceux forme le réseau. La soude, tirée d'un minéral, le natron, ou des cendres de plantes des marais salés, abaisse la température de fusion jusqu'à ce qu'un feu de bois puisse l'atteindre. La chaux, souvent présente dans le sable sous forme de débris de coquillages, stabilise le verre pour que l'eau ne l'attaque pas.

La planche montre un four de verrier rond du type décrit par Georgius Agricola en 1556, avec la canne et le marbre du souffleur.

Comment ça marche

Le four compte trois niveaux. Le bois brûle dans la chambre inférieure. Ses flammes montent par un trou rond dans la chambre du milieu, où des pots d'argile contiennent le verre en fusion ; Agricola décrit des pots ventrus d'environ deux pieds de haut, introduits par des ouvertures dans la paroi. La chaleur passe ensuite par une ouverture plus petite dans la chambre supérieure, moins chaude, qui sert à la recuisson.

Le souffleur plonge le bout d'une canne de fer dans un pot et la fait tourner pour enrouler une paraison de verre en fusion, comme du miel sur une cuillère. En la roulant sur le marbre, une plaque lisse de pierre ou de fonte, il la centre et en refroidit la peau. Un souffle crée une bulle. Il réchauffe ensuite la pièce à l'ouvreau, souffle et balance la canne pour l'allonger, et la façonne avec des pinces, des palettes et des mailloches de bois. Pour finir le col, on fixe le vase par le fond sur une tige de fer pleine, le pontil, et on le détache de la canne.

Les outils du souffleur : canne, tige de fer, pinces, ciseaux, palette et mailloche de bois.

Le verre se rétracte en refroidissant, et sa peau durcit avant le cœur. Une pièce refroidie à l'air libre garde des tensions internes et peut éclater des heures plus tard. La recuisson l'évite : les vases finis passent dans une chambre chaude et refroidissent lentement pendant de longues heures. Agricola notait que des vases mal refroidis se briseraient en morceaux.

La couleur vient des impuretés et des ajouts. Le fer du sable teinte le verre de vert ou de brun ; le manganèse, que les verriers de l'époque romaine ajoutaient comme décolorant, le compense, et le cobalt donne un bleu profond.

Comment le fabriquer

On cueille le verre dans un four à bien plus de 1 000 °C et on le façonne tant qu'il est encore rouge. Apprenez le soufflage dans un atelier de verre chaud ou un stage avec un formateur ; une fois les bases acquises, les ateliers louent des heures de four.

Partir du calcin. Les débutants travaillent du verre tout prêt, acheté sous forme de calcin destiné à la refonte et fondu dans le four de l'atelier. Faire du verre à partir d'une composition brute de sable, de soude et de chaux demande des températures plus hautes et de longues fusions, et ces poudres sont dangereuses.

Cueillir et marbrer. Préchauffez le bout de la canne, plongez-le dans le pot et tournez régulièrement pour cueillir une petite paraison. Roulez-la sur le marbre pour la rendre ronde et régulière.

Souffler et façonner. Soufflez brièvement, bouchez l'embout avec le pouce et laissez l'air se réchauffer et se dilater. Réchauffez souvent à l'ouvreau et faites toujours tourner la canne pour que le verre ne s'affaisse pas. Façonnez avec des mailloches de bois mouillées, des palettes et des pinces, et formez avec les pinces un col étroit, le trait de pince, entre la pièce et la canne.

Transférer et finir. Un aide approche du fond un pontil garni d'une goutte de verre chaud ; refroidissez le trait de pince d'une goutte d'eau déposée avec les pinces et frappez la canne pour que la pièce passe sur le pontil. Réchauffez, ouvrez le col aux pinces, puis, comme l'indique le formateur, détachez la pièce du pontil sur un support résistant à la chaleur et posez-la doucement dans l'arche de recuisson.

Recuire. Le four de recuisson maintient la pièce à une température donnée, puis la refroidit lentement selon un cycle adapté au verre et à son épaisseur ; pour de petites pièces, le cycle dure en général une nuit. Ne la manipulez qu'une fois terminé le cycle fixé par le formateur.

> **Sécurité.** Fours, ouvreaux et verre chaud provoquent des brûlures graves et des incendies : portez des vêtements en fibres naturelles et des chaussures fermées, attachez vos cheveux et considérez toute pièce de verre comme chaude tant que vous n'êtes pas sûr du contraire. Protégez vos yeux avec des lunettes conçues pour le verre, contre l'éblouissement et les infrarouges. Le sable siliceux et les poudres de composition ne doivent pas être respirés : laissez la fabrication du verre brut aux ateliers équipés. Recuisez chaque pièce finie, et n'exposez jamais du verre chaud à l'eau ou à un courant d'air froid : il peut éclater. Ne fondez que du verre de composition connue, approuvé par l'atelier, dans un four ventilé : le vieux cristal au plomb et le verre coloré inconnu peuvent dégager des fumées nocives.

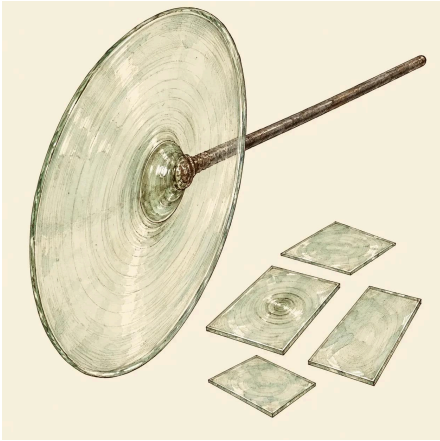
Histoire et évolution

Un flacon façonné sur noyau : avant le soufflage, les petits vases se montaient autour d'un noyau qu'on retirait ensuite.

Le verre apparaît d'abord sous forme de petites perles en Mésopotamie dans la seconde moitié du IIIe millénaire av. J.-C., sans doute dans le prolongement des glaçures et de la faïence. Les premiers vases, de la fin du XVIe siècle av. J.-C., furent faits en Mésopotamie du Nord, puis bientôt en Égypte, par façonnage sur noyau : on enroulait le verre chaud autour d'un noyau d'argile et de sable fixé sur une tige de métal, on le décorait de filets colorés, puis on grattait le noyau une fois le verre refroidi.

La verrerie se scinda plus tard en deux métiers. De grands fours, près des côtes du Levant et de l'Égypte, transformaient sable et natron en verre brut, coulé en blocs qui pouvaient peser une dizaine de tonnes ; on brisait ces blocs, et les morceaux traversaient la Méditerranée jusqu'aux ateliers qui les refondaient et les façonnaient. Cette division du travail existait vers le milieu du Ier millénaire av. J.-C. Dans la seconde moitié du Ier siècle av. J.-C., des artisans de cette région apprirent à souffler le verre à la canne. Le plus ancien témoignage daté avec précision, des tubes de verre soufflés en ampoule, provient d'un atelier de Jérusalem. Le soufflage rendit le verre bon marché, et dans l'Empire romain il servit à la vaisselle, aux flacons de conservation et aux vitres.

En Europe du Nord, à partir de l'an mil environ, les verriers remplacèrent la soude par la potasse tirée des cendres de bois. En 1291, Venise ordonna à ses verriers de transférer leurs fours sur l'île de Murano. George Ravenscroft, qui fit breveter un nouveau verre clair en 1674, passe traditionnellement pour l'inventeur du cristal au plomb anglais. Pendant des siècles, les vitres furent découpées dans du verre en plateau, une bulle ouverte et tournée en disque, ou dans des manchons soufflés, fendus et aplatis ; les deux méthodes limitaient la taille des carreaux. Dans les années 1950, Alastair Pilkington et Kenneth Bickerstaff mirent au point à St Helens le procédé du verre flotté, où le verre en fusion s'étale en ruban plat sur un bain d'étain fondu. Exploité de façon rentable vers 1960, c'est aujourd'hui la façon normale de fabriquer le verre à vitre.



Le verre en plateau, ou verre à boudine : une bulle ouverte au pontil et tournée jusqu'à former un disque. Le centre épais où tenait la tige est la boudine.

Chiffres clés

Plus anciens objets en verre
Des perles, Mésopotamie, seconde moitié du IIIe millénaire av. J.-C.

Premiers vases en verre
Façonnés sur noyau, fin du XVIe siècle av. J.-C.

Soufflage
Seconde moitié du Ier siècle av. J.-C., Méditerranée orientale

Verre flotté
Verre flottant sur un bain d'étain fondu, mis au point dans les années 1950

Sources

1. The history of ancient glass · Republic of Türkiye, Ministry of Culture and Tourism https://www.ktb.gov.tr/EN-120370/the-history-of-ancient-glass.html
2. Composition of Late Hellenistic to Early Roman glass vessels from the Souk excavations, Beirut (Freestone, Brems and Degryse, Rendiconti Lincei, 2025) · UCL Institute of Archaeology https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10215996/1/Freestone_s12210-025-01311-x.pdf
3. Georgius Agricola, De re metallica (1556), trans. H. C. and L. H. Hoover, Book XII · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/cache/epub/38015/pg38015.txt
4. History of glass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_glass
5. Float glass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Float_glass
6. Standard Glass DGG X, Soda-Lime-Silica Glass: viscosity-temperature behaviour measured by the PTB · Deutsche Glastechnische Gesellschaft https://hvg-dgg.de/fileadmin/Standard_Glass_DGG_X.pdf
7. Physical properties of glass · EAG Laboratories https://www.eag.com/app-note/physical-properties-of-glass/
8. Intraoral pressure in ethnic wind instruments (Goss, 2013), citing intraoral pressures up to 200 mbar in glassblowing · arXiv https://arxiv.org/abs/1308.5214
9. Draper point · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Draper_point

Faits vérifiés le 2026-10-12

Métallurgie du fer

Usage élargi vers 1200 av. J.-C.; minerai, charbon et bas fourneau

v. 1 200 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite: Bronze (p. 125), Charbon de bois (p. 65)

Mène à: Bicyclette (p. 255), Conserves & pasteurisation (p. 250), Moteur à combustion interne (p. 316), Boussole (p. 196), Moteur électrique (p. 280), Générateur électrique (p. 276), Horloge mécanique (p. 203), Presse à imprimer (p. 207), Machine à coudre (p. 272), Machine à vapeur (p. 229), Acier (p. 142), Transformateur (p. 333)

1 Soufflets 2 Tuyère (buse d'argile) 3 Charge de charbon de bois et de minerai 4 Paroi d'argile du fourneau 5 Loupe de fer 6 Scories écoulées

La métallurgie du fer extrait le métal du minerai chauffé avec du charbon de bois dans un petit fourneau d'argile alimenté en air par des soufflets. Ce bas fourneau produit normalement une masse solide et pauvre en carbone, la loupe, que le forgeron compacte puis forge.

Ce que c'est

Très abondant dans l'écorce terrestre, le fer ne s'y trouve presque jamais à l'état de métal, mais dans des minerais sous forme d'oxydes: hématite rouge, magnétite noire, minerai brun des marais. La réduction consiste à arracher l'oxygène de ces minerais pour garder le métal.

Pendant près de trois mille ans, l'outil de ce travail a été le bas fourneau, un four d'argile d'environ un mètre de haut où le charbon de bois brûle sous le vent des soufflets. Il produit une loupe, une masse spongieuse de fer mêlé

de scories. Martelée à chaud, elle devient du fer forgé, tenace et facile à travailler. Il a fourni socs, clous et épées jusqu'à l'arrivée du haut fourneau en Europe, à la fin du Moyen Âge.

Une loupe brute est une éponge de fer et de scories. Des heures de forge en font une barre.

Comment ça marche

Devant la tuyère, le charbon brûle et chauffe le fourneau. Plus haut dans la cuve, faute d'oxygène, il forme du monoxyde de carbone, un gaz qui enlève l'oxygène de l'oxyde de fer en remontant à travers la charge. Le minerai perd son oxygène par étapes, et la réaction devient rapide au-delà de 900 °C environ.

On consolide d'abord la loupe chaude par des coups légers ; on peut la réchauffer entre deux séries de frappes.

Le fourneau travaille vers 1 100 à 1 200 °C et produit normalement une loupe solide, pauvre en carbone. Le fer pur fond à 1 538 °C, mais un fer riche en carbone peut fondre aux températures du bas fourneau. La silice et les autres minéraux du minerai se combinent avec une partie de l'oxyde de fer pour former une scorie riche en fer, qui peut devenir fluide vers 1 180 °C selon sa composition. La scorie descend près de la tuyère, la buse d'argile qui amène l'air, tandis que les grains de métal s'agglomèrent juste en dessous en une loupe. Le fondeur évacue la scorie par une arche à la base, ou elle s'accumule dans une fosse sous le fourneau.

La loupe sort du fourneau incandescente, poreuse, chargée de scories et de charbon. Si elle est fragile, les premiers coups doivent être légers, parfois donnés au maillet de bois. On peut aussi la laisser refroidir puis la réchauffer avant de la compacter ; le martelage immédiat au blanc n'est pas indispensable. Les chauffes et les passes de forge successives compactent le métal et expulsent une grande partie des scories. La perte de poids dépend de la loupe et du travail de forge. Le carbone est généralement peu abondant et inégalement réparti : une même loupe peut contenir du fer doux et des zones d'acier.

Comment s'y prendre

Voici les grandes lignes d'une petite réduction, pas un plan coté. Il faut de l'argile mêlée de sable et de paille, du minerai, beaucoup de charbon de bois, des soufflets et une équipe pour la journée.

Préparer le minerai. Le griller dans un feu ouvert pour chasser l'eau et le rendre cassant, puis le concasser en morceaux d'un centimètre environ. Casser le charbon à deux centimètres et tamiser la poussière pour que les gaz circulent dans la charge.

Monter la cuve. Sur un sol sec, élever un cylindre d'argile d'environ un mètre de haut et de 25 à 30 cm de diamètre intérieur, aux parois épaisses de plusieurs doigts. Prévoir un trou en bas pour la tuyère et une arche que l'on peut

ouvrir puis refermer à l'argile. Laisser sécher plusieurs jours, puis finir avec un petit feu intérieur.

Préchauffer et charger. Remplir la cuve de charbon et envoyer de l'air jusqu'à ce qu'elle rougeoie sur toute sa hauteur. Dans les essais du WIRG, les charges comptent environ 1 kg de minerai et 1 kg de charbon, ajoutés toutes les 10 à 15 minutes, pour un total annoncé de 15 à 20 kg de chacun. Cela représente 15 à 20 charges doubles, soit environ 2,5 à 5 heures à ce rythme, sans imposer cinq heures de chargement continu. La durée annoncée d'environ cinq heures inclut la combustion finale ; le préchauffage se fait à part. Prévoir du charbon supplémentaire pour le préchauffage et la dernière charge de charbon seul : le total des charges doubles ne couvre pas tout le combustible.

Régler le vent. Surveiller la température et la descente des charges, puis ajuster l'air pour maintenir la réduction et l'écoulement de la scorie. L'absorption de carbone dépend du rapport charbon/minerai, de l'atmosphère du fourneau, du temps de séjour et de la chimie des scories. Un débit d'air plus élevé ne suffit pas à prédire la formation de fonte : certains essais ont donné un fer moins carburé avec davantage d'air. Évacuer la scorie selon son accumulation ; le WIRG signale une première évacuation après environ trois heures.

Extraire et compacter. Une fois la dernière charge consumée, ouvrir la façade et sortir la loupe à la pince. Si elle est fragile, commencer doucement, par exemple au maillet de bois, puis renforcer les coups lorsqu'elle tient mieux. Il est aussi possible de la laisser refroidir et de la réchauffer avant le compactage. La remettre à la forge entre les passes jusqu'à obtenir une barre cohérente.

> **Sécurité.** Un bas fourneau dépasse 1 100 °C. La scorie liquide cause des brûlures profondes et des incendies. Travailler dehors sur un sol nu et sec, loin de l'herbe sèche, avec du sable sec à portée. Garder les outils et le sol de coulée secs. Ne jamais laisser l'eau toucher les scories chaudes ou liquides ni pénétrer dans le fourneau chaud : sa vaporisation brutale peut provoquer une explosion. Porter bottes de cuir, gants, tablier et lunettes, et ne jamais se tenir devant l'arche de coulée. Le gueulard rejette du monoxyde de carbone : garder le visage à distance et ne jamais travailler en intérieur. L'argile ou le minerai humides peuvent éclater à la chaleur.

Histoire et évolutions

On a travaillé le fer avant de savoir le réduire. Certains des plus anciens objets en fer ont été martelés dans des météorites, qui contiennent du nickel. Des indices situent des réductions anciennes en Anatolie, dans l'actuelle Turquie, mais le lieu et la date de l'invention restent incertains. À Kaman-Kalehöyük, des fragments datés d'environ 1800 av. J.-C. contiennent déjà de l'acier, et leur carbone très variable fait penser à des forgerons qui tâtonnaient encore. Vers 1250 av. J.-C., le roi hittite Hattusili III évoque dans une lettre la fabrication de « bon fer ».

Vers 1200 av. J.-C., l'usage du fer s'élargit au Proche-Orient, à des rythmes différents selon les régions. La réduction était déjà connue auparavant. Vers 1100 av. J.-C., il est courant à Chypre et au Levant ; la majeure partie de l'Europe l'utilise à partir de 800 av. J.-C. environ, et vers 500 av. J.-C. le bas fourneau est connu de la Méditerranée à la Scandinavie. Contrairement au cuivre et à l'étain du bronze, le minerai de fer se trouve presque partout.

L'Afrique a développé ses propres traditions, avec des fourneaux en Nubie dès le VIIe siècle av. J.-C. et en Afrique de l'Ouest au plus tard au VIe. La Chine a sans doute appris la réduction en bas fourneau de l'ouest vers le VIIIe siècle av. J.-C., avant de passer très tôt à des fourneaux assez chauds pour couler de la fonte liquide.

En Europe, les loupes pèsent environ deux kilos pendant des siècles. Les fourneaux romains, qui pouvaient atteindre deux mètres de haut, donnent des loupes de 10 à 15 kg, et vers 1500 les marteaux hydrauliques travaillent des loupes de 100 kg et plus. Le haut fourneau de Lapphyttan, en Suède, fonctionnait déjà dès le milieu

du XIIe siècle. Les hauts fourneaux se sont diffusés davantage au cours des siècles médiévaux suivants et produisaient de la fonte en quantité vers 1500 ; les bas fourneaux ont ensuite reculé progressivement. Les forges catalanes d'Espagne et du sud de la France fonctionnaient encore au milieu du XIXe siècle.

Soufflets en pots : en pompant les deux peaux tour à tour, on garde un vent continu.

Chiffres clés

Température du fourneau
Environ 1 100 à 1 200 °C (le fer pur fond à 1 538 °C)

Charge
Dans les essais du WIRG, environ 1 kg de minerai et 1 kg de charbon par charge, toutes les 10 à 15 minutes

Durée d'une réduction
Environ 5 heures pour les charges et leur combustion finale dans les essais du WIRG ; préchauffage à part

Poids de la loupe
Environ 2 kg au premier âge du fer, 10 à 15 kg dans les fourneaux romains

Diffusion de l'usage
Vers 1200 av. J.-C. au Proche-Orient ; la réduction est plus ancienne

Sources

1. Bloomery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bloomery
2. Iron and Steel in Early Europe · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/backbone/ra_3_1.html
3. Experimental Bloomery 4: The smelt · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/?p=930
4. Questioning Diversity (of Iron) in the Workplace: Bloomery Iron, Cast Iron, China and the West (Liu & Wood, 2025) · Internet Archaeology 69 https://www.intarch.ac.uk/journal/issue69/14/full-text.html
5. Kaman-Kalehöyük · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Kaman-Kaleh%C3%B6y%C3%BCk
6. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf
7. Lee Sauder and Skip Williams Smelt Iron · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/advanced/aa_2_5.html
8. Experimental Bloomery Ironmaking: The Bloom · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/Expt/bloom.htm
9. Experimental Bloomery Ironmaking: The Smelt · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/Expt/smelt.htm
10. Medieval Iron in Society (Rapport H 34) · Jernkontoret https://www.jernkontoret.se/en/publications/history-of-mining-and-metallurgy1/Publications/rapport-h-34/
11. The Innovation and Adoption of Iron in the Ancient Near East (Erb-Satullo, 2019) · Journal of Archaeological Research, Springer Nature https://link.springer.com/article/10.1007/s10814-019-09129-6
12. Flow Rates · Darrell Markewitz, Wareham Forge https://www.warehamforge.ca/ironsmelting/flowrates.html
13. Experimental Iron Smelting: Norse Bellows Air · Darrell Markewitz, Wareham Forge https://warehamforge.ca/ironsmelting/norse-air.html
14. The St Fagans Experimental Bloomery: the First Six Years (Young, 2005) · Historical Metallurgy Society News 59 https://historicalmetallurgy.org/media/pjwd2b5o/hmsnews59.pdf

Faits vérifiés le 2026-10-12

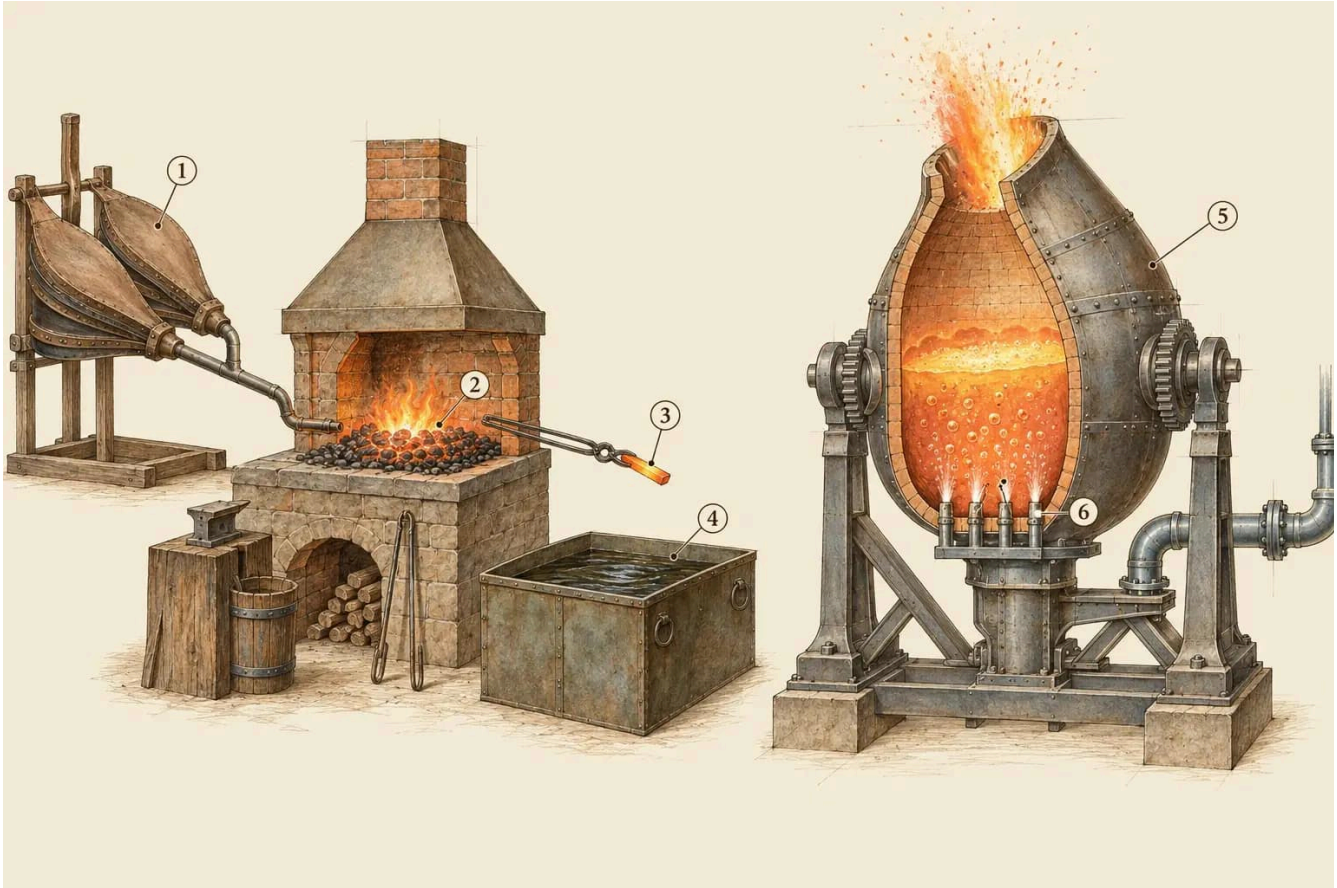
Acier

Du fer avec juste assez de carbone

v. 1 000 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Métallurgie du fer (p. 138), Charbon de bois (p. 65)

Mène à : Moteur à combustion interne (p. 316), Boussole (p. 196), Presse à imprimer (p. 207), Béton armé (p. 311), Machine à coudre (p. 272), Turbine à vapeur (p. 328), Turbine hydraulique (p. 267), Éolienne (p. 342)



1 Soufflets 2 Foyer de forge 3 Acier chaud tenu à la pince 4 Bac de trempe 5 Convertisseur Bessemer
6 Tuyères d'air au fond du convertisseur

L'acier est du fer qui contient un peu de carbone, en quantité maîtrisée, le plus souvent entre 0,1 et 1,5 % environ. Il se forge à chaud ; assez riche en carbone, il durcit quand on le chauffe puis le trempe, et le revenu le rend ensuite plus tenace, au prix d'un peu de dureté.

Ce que c'est

Le fer pur est mou : un couteau qui en serait fait plierait et s'émousserait vite. Qu'on y ajoute un peu de carbone, de quelques dixièmes de pour cent à environ un et demi, et le métal se forge toujours à chaud. S'il contient assez de carbone, chauffé puis plongé dans l'eau ou l'huile, il devient assez dur pour entailler le fer. Cet alliage, c'est l'acier.

Par sa teneur en carbone, il se place entre deux autres matériaux. Le fer forgé ne contient presque pas de carbone : tenace et facile à souder, il ne durcit pas. La fonte en contient 2 à 4 % : elle se coule dans des moules, mais elle

casse et ne se forge pas. L'acier, lui, passe de dur à tenace selon la façon dont le forgeron le chauffe et le refroidit. C'est aujourd'hui, de loin, le métal le plus utilisé.

Comment ça marche

Les atomes de carbone, petits, se logent dans les interstices entre les atomes de fer. Froid, le fer en retient très peu, et l'excédent forme un carbure de fer très dur. Dans un acier refroidi lentement, ce carbure se dispose en fines lamelles alternant avec du fer doux : le mélange est solide et se lime encore.

Au-dessus de 727 °C environ, le cristal de fer commence à se réorganiser sous une forme qui dissout le carbone, et, une fois la transformation achevée, l'aimant n'attire plus le métal. La température et la durée de maintien nécessaires pour dissoudre assez de carbure dépendent de la nuance. Refroidi lentement, l'acier laisse le carbone ressortir sous forme de carbure. Trempé, il ne lui en laisse pas le temps : le carbone reste piégé dans un cristal déformé, la martensite, très dure et cassante comme du verre.

C'est pourquoi on procède au revenu : on réchauffe l'acier entre 200 et 350 °C environ, ce qui détend le cristal et le rend bien plus tenace, au prix d'un peu de dureté. Sur l'acier poli se forme un mince film d'oxyde dont la couleur suit la température, du jaune paille pâle vers 210 °C au bleu foncé vers 290 °C, en passant par le brun et le pourpre. Ces couleurs, qui dépendent aussi du temps et de l'état de surface, ont longtemps servi de repère approximatif : paille pour un rasoir ou un ciseau à bois, pourpre à bleu pour un ressort. Le recuit, une chauffe suivie d'un refroidissement très lent, donne au contraire l'état le plus doux, facile à scier et à limer.

Quand on chauffe la tige, les couleurs gagnent le tranchant ; le forgeron refroidit l'outil quand la bonne y arrive.

Sous 0,3 % de carbone environ, l'acier durcit peu ; plus il en contient, plus il devient dur et moins il pardonne un choc. Un fer enfoui dans du charbon de bois et maintenu au rouge pendant des heures absorbe du carbone par sa surface. Trempé ensuite, il acquiert une peau dure sur un cœur tenace : c'est la cémentation suivie de trempe.

Comment s'y prendre

Le traitement thermique est la part de la sidérurgie à la portée d'un petit atelier. Partez d'une barre d'acier à outils non allié et riche en carbone, de nuance connue, et gardez la fiche du fournisseur : elle donne les températures, les durées de maintien et le milieu de trempe exacts. Une vieille lime est la source traditionnelle, mais son acier est inconnu et certaines limes bon marché ne sont durcies qu'en surface.

Adoucir et façonner. Recuisez la barre comme l'indique sa fiche. La méthode traditionnelle, qui consiste à la porter au rouge sombre puis à la laisser refroidir toute une nuit dans la cendre de bois, n'est qu'approximative. Meulez la barre adoucie en un petit chasse-goupille ou un burin, en la gardant froide.

Tremper. Chauffez l'extrémité de travail de façon égale, au charbon de bois ou au chalumeau. Le repère ancien veut qu'on chauffe jusqu'à ce qu'un aimant ne colle plus, puis un peu au-delà, jusqu'au rouge cerise vu à l'ombre, mais la température et le maintien indiqués par la fiche sont plus sûrs. Plongez la pièce droite et en entier dans le milieu de trempe qu'elle indique, en général de l'huile pour un petit outil, dans un bain de plusieurs litres maintenu bien au-dessous de son point d'éclair. Montez et descendez la pièce jusqu'à ce qu'elle refroidisse.

Vérifier. Une lime neuve passée sur la partie trempée doit glisser sans mordre. Si elle accroche, la surface a peut-être seulement perdu du carbone au feu, ou bien la trempe a échoué : meulez un petit point jusqu'au métal brillant

et refaites l'essai avant de chauffer de nouveau.

Faire revenir aussitôt. La fiche donne la température et la durée du revenu, qu'un four tient le mieux : un cycle courant est une heure à température, un retour à la température ambiante, puis une seconde heure. La méthode traditionnelle est plus rapide et seulement approximative. Polissez l'extrémité à l'abrasif jusqu'au métal brillant, chauffez doucement la tige et regardez les couleurs avancer vers la pointe. Refroidissez l'outil quand le brun-pourpre, vers 260 à 270 °C, atteint le tranchant d'un burin, ou le jaune paille, vers 220 °C, celui d'un ciseau à bois.

> **Sécurité.** La chaleur de la forge brûle profondément, et l'acier sous le rouge paraît froid alors qu'il ne l'est pas : traitez toute pièce comme chaude. Portez des lunettes de protection, avec un écran facial par-dessus pour la trempe, des gants de cuir pour manier les pièces chaudes mais jamais au touret à meuler, des chaussures en cuir et des vêtements en coton ou en laine. Travaillez dehors ou avec une forte ventilation : la forge dégage du monoxyde de carbone et l'huile chaude de la fumée. Utilisez un bac à huile en métal avec un couvercle en métal à portée de main, et plongez la pièce entièrement et vite, ce qui limite les flambées. Si elle prend feu, fermez le couvercle ; ne jetez jamais d'eau sur de l'huile en feu et ne laissez jamais d'eau entrer dans l'huile chaude. Gardez un extincteur à poudre à proximité. Ne frappez, ne pliez, ne laissez tomber ni n'essayez de casser un acier trempé non revenu : il peut éclater en projetant des éclats coupants.

Histoire et évolutions

Des fragments de Kaman-Kalehöyük, en Anatolie, datés vers 1800 av. J.-C., contiennent déjà de l'acier, sans doute par accident. Un pic de mineur du mont Adir, en Galilée, longtemps daté du XIIe siècle av. J.-C., présente une structure trempée puis légèrement revenue, mais sa date a depuis été mise en doute. Aucune trouvaille ne fixe le début d'une fabrication délibérée de l'acier. Cette planche retient par convention la date de 1000 av. J.-C. environ, l'époque où le fer entre dans l'usage courant au Levant, entre 1100 et 900 av. J.-C. environ.

Un creuset cassé après la chauffe, et le pain d'acier qu'il contenait.

Dans le sud de l'Inde, du fer enfermé dans des creusets d'argile avec une matière riche en carbone était fondu en pains homogènes de 1 à 1,5 % de carbone ; à Kodumanal, au Tamil Nadu, des creusets remontent au IIe siècle av. J.-C. environ. Cet acier au creuset, que les Européens appelleront wootz, est celui des lames à motifs dites en acier de Damas. À Sri Lanka, des fourneaux à flanc de colline soufflés par la mousson ont produit de l'acier du VIIe au XIe siècle, peut-être pour le commerce dans l'océan Indien.

La Chine a suivi encore une autre voie. Une tombe du royaume de Yan, du début du IIIe siècle av. J.-C., contient déjà de l'acier trempé, mais le fer chinois était alors surtout de la fonte. En lui retirant du carbone, on obtenait des métaux plus doux : maintenue chaude à l'air pendant des jours, ou brassée dans un foyer d'affinage sous le vent des soufflets, la fonte devenait acier ou fer. Les foyers d'affinage fouillés datent du Ier siècle av. J.-C.

L'Europe moderne a pratiqué la cémentation, mise au point d'abord en Allemagne. À Derwentcote, en Angleterre, vers 1730, des barres de fer suédois enfouies dans le charbon de bois restaient six à dix jours au-dessus de 1 100 °C ; l'acier poule obtenu était ensuite mis en paquet et soudé à la forge en acier corroyé. Vers 1740, l'horloger Benjamin Huntsman fond l'acier poule dans des creusets et le coule en un acier homogène.

En 1856, Henry Bessemer souffle de l'air à travers de la fonte liquide : le carbone et le silicium brûlent, et leur chaleur garde le métal fondu. Les fours Martin suivent dans les années 1860. En 1952, à Linz, en Autriche, des

convertisseurs soufflés à l'oxygène pur entrent en service ; ils produisent encore l'essentiel de l'acier, et les fours électriques, alimentés surtout en ferraille, environ 29 %.

Dans le caisson de cémentation, les barres de fer passent une semaine ou plus dans le charbon et en sortent boursouflées.

Chiffres clés

Carbone

Environ 0,1 à 1,5 % ; moins dans le fer forgé, 2 à 4 % dans la fonte

Couleurs de revenu

Paille vers 220 °C, pourpre vers 270 °C, bleu foncé vers 290 °C

Production mondiale en 2024

Environ 1,9 milliard de tonnes, dont 29 % au four électrique

Chauffe de trempe

La transformation commence vers 727 °C ; chaque nuance a sa température de trempe et son maintien

Soufflage Bessemer

Environ 15 tonnes de fonte changées en acier en 10 à 20 minutes

Sources

1. Iron and Steel in Early Europe · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/backbone/ra_3_1.html
2. A Brief History of Martensites · Sethna group, Cornell University https://sethna.lassp.cornell.edu/Tweed/Martensite_History.html
3. The Transition from Bronze to Iron in Canaan: Chronology, Technology, and Context (Yahalom-Mack & Eliyahu-Behar, 2015) · Radiocarbon, Cambridge University Press https://doi.org/10.2458/azu_rc.57.18563
4. Early iron in China, Korea, and Japan (Wagner) · Donald B. Wagner https://donwagner.dk/KoreanFe/KoreanFe.html
5. Crucible steel in South India: preliminary investigations on crucibles from some newly identified sites (Srinivasan & Griffiths) · MRS Online Proceedings Library, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/crucible-steel-in-south-indiapreliminary-investigations-on-crucibles-from-some-newly-identified-sites/0C7F9DB996F0DD5758502D8F62201947
6. Wootz Crucible Steel: A Newly Discovered Production Site in South India (Srinivasan, 1994) · Papers from the Institute of Archaeology, UCL https://student-journals.ucl.ac.uk/pia/article/id/164
7. Wind-Powered Furnaces · Archaeology, Archaeological Institute of America https://archive.archaeology.org/9609/newsbriefs/srilanka.html
8. History of Derwentcote Steel Furnace · English Heritage https://www.english-heritage.org.uk/visit/places/derwentcote-steel-furnace/history/
9. A Crucible of Steel History · West Yorkshire Steel https://westyorkssteel.com/blog/a-crucible-of-steel-history
10. Bessemer Process · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Bessemer_Process
11. Bessemer Converter · Sheffield Museums https://www.sheffieldmuseums.org.uk/whats-on/bessemer-converter/
12. The history of LD steelmaking: back to the roots · Primetals Technologies https://www.primetals.com/en/metals-magazine/the-history-of-ld-steelmaking-back-to-the-roots/
13. 60 years of the Linz-Donawitz (LD) process · voestalpine https://www.voestalpine.com/stahl/en/Stories/60-years-of-the-Linz-Donawitz-LD-process
14. The share of EAF in global steel production in 2024 increased to 29.1% (worldsteel data) · GMK Center https://gmk.center/en/news/the-share-of-eaf-in-global-steel-production-in-2024-increased-to-29-1/
15. Austenitizing, Magnetism, and Heat Treating · Larrin Thomas, Knife Steel Nerds https://knifesteelnerds.com/2019/03/18/magnet-heat-treating/
16. Steel Tempering Temperatures: Colour Chart · West Yorkshire Steel https://westyorkssteel.com/technical-information/steel-heat-treatment/tempering-temperatures

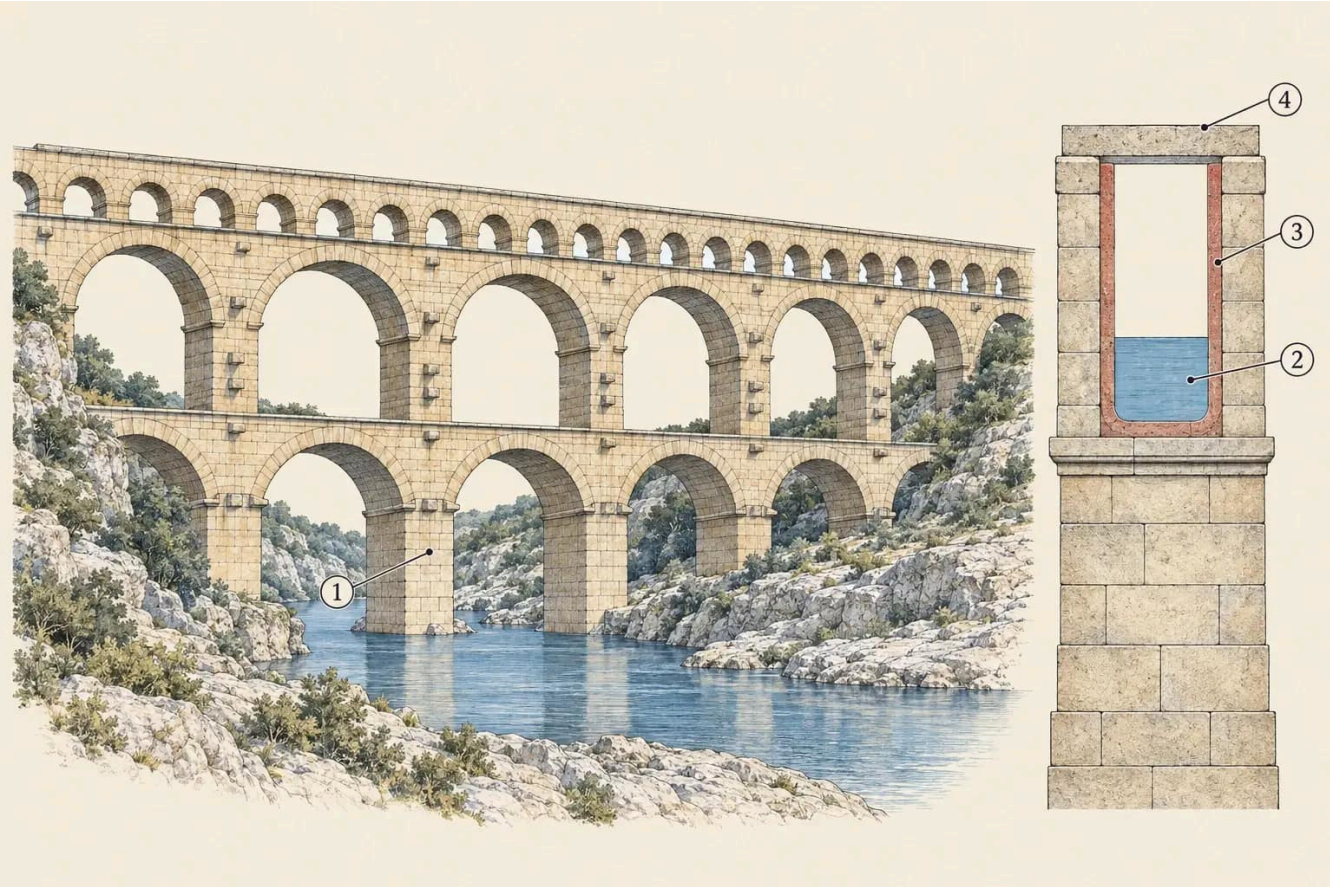
Faits vérifiés le 2026-10-14

Aqueduc

L'eau portée par la seule gravité

v. 690 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Briques (p. 40), Mesures et étalons (p. 129), Chaux et mortier de chaux (p. 31), Irrigation (p. 52), Arc et voûte (p. 74)



1 Arcades (piles et arches) 2 Canal (specus) 3 Enduit étanche (opus signinum) 4 Dalles de couverture

Un aqueduc amène l'eau d'une source lointaine jusqu'à une ville dans un canal qui descend très légèrement sur toute sa longueur, si bien que la seule gravité suffit à faire avancer l'eau. Les Romains en ont construit des centaines, en tunnel, en tranchée couverte ou sur des arcades comme le pont du Gard, et certains transportaient plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par jour.

Ce que c'est

Un aqueduc est un cours d'eau artificiel qui conduit l'eau d'une source jusqu'au lieu où on l'utilise. L'essentiel de son tracé reste invisible : un canal de pierre ou de béton, couvert, qui court dans une tranchée ou un tunnel à flanc de colline. Les hautes arcades qu'on imagine d'abord ne sont que les endroits où le canal devait franchir une vallée sans perdre d'altitude.

La planche montre un de ces franchissements, du type bâti au-dessus du Gardon près de Nîmes au Ier siècle de notre ère. Le canal passe au sommet du rang supérieur.

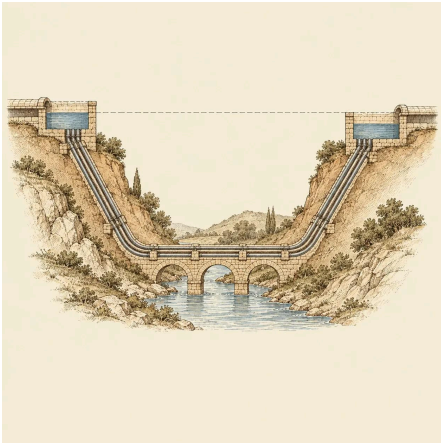
Comment ça marche

Là où l'eau s'écoule à surface libre, c'est-à-dire sur la plus grande partie d'un aqueduc, le canal doit descendre sans interruption de la source à la ville, sans jamais remonter ni plonger trop vite. Avec trop peu de pente, l'eau ralentit et dépose ses limons ; avec trop de pente, elle ronge l'enduit. L'aqueduc de Nîmes, long d'environ 50 km, ne perd que 12 à 13 m entre la source et la ville (les mesures diffèrent un peu), soit environ 25 cm par kilomètre en moyenne, et beaucoup moins sur certains tronçons. Sur le pont du Gard lui-même, la pente se compte en centimètres.

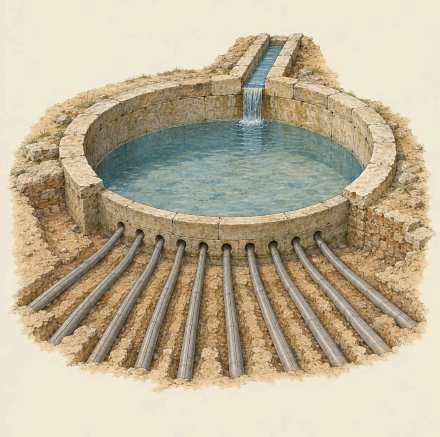
Le canal, appelé specus, avait d'ordinaire la largeur d'un homme et un peu plus de hauteur, pour que des ouvriers puissent y entrer et le curer. Son fond et ses parois recevaient un opus signinum, un mortier de chaux chargé de tuiles et de céramique pilées, qui durcit et retient l'eau. Des bourrelets arrondis au pied des murs fermaient les angles, là où commencent les fuites. Des dalles ou une voûte couvraient le tout ; elles arrêtaient la poussière et le soleil et empêchaient l'eau de se réchauffer.

Tracer une telle pente sur des dizaines de kilomètres était l'affaire des arpenteurs. Vitruve, à la fin du Ier siècle av. J.-C., décrit le chorobate, une longue table de bois dont les fils à plomb, ou par vent fort une rigole remplie d'eau, indiquent si elle est de niveau. Avec cet instrument et des jalons de visée, une équipe reportait une ligne de niveau à travers tout un paysage et marquait la pente sur des piquets.

Les vallées profondes pouvaient aussi se franchir par un siphon inversé. L'eau entrait dans un réservoir sur le premier versant, descendait dans des tuyaux de plomb étanches, traversait le fond de la vallée sur un pont bas et remontait l'autre versant jusqu'à un second réservoir placé un peu plus bas. Vitruve décrit déjà ce dispositif et appelle venter, le ventre, le long tronçon presque horizontal qui traverse le fond de la vallée. Le siphon économisait la maçonnerie, mais le plomb coûtait cher et les joints devaient tenir sous une forte pression. Selon la traduction habituelle, son texte prévoit aussi des évents pour laisser s'échapper l'air piégé, mais le sens exact du terme qu'il emploie reste discuté. Pour les conduites ordinaires, il préférait la terre cuite, car il jugeait malsaine l'eau qui passait dans le plomb.



Un siphon inversé : l'eau remonte sur l'autre versant, mais jamais tout à fait jusqu'à son niveau de départ.



Le bassin de répartition circulaire de Nîmes, d'où dix tuyaux de plomb partaient vers les quartiers.

En ville, l'eau arrivait dans un bassin de répartition, le castellum. Vitruve en décrit un divisé en trois, avec des sorties distinctes pour les fontaines publiques, les thermes et les maisons particulières, disposé de sorte que les fontaines soient les dernières à manquer d'eau. Celui qui subsiste à Nîmes est un bassin rond d'environ 5,5 m de diamètre, d'où dix tuyaux de plomb desservaient les quartiers. L'eau coulait jour et nuit ; ce qui n'était pas utilisé allait rincer les égouts. Vitruve ajoute que les redevances payées par les particuliers devaient financer l'entretien de l'aqueduc. À Nîmes, les estimations du débit vont d'environ 20 000 à 40 000 m^3 par jour, et l'eau mettait environ un jour à venir de la source.

Comment le construire

Les grands aqueducs romains exigeaient des fonds publics, des arpenteurs qualifiés et de nombreux ouvriers. À l'échelle d'un jardin, les mêmes principes permettent d'amener sans pompe l'eau d'une source ou d'une citerne de toit jusqu'à une mare ou un champ.

Le chorobate : une table de nivellement d'environ 20 pieds romains, réglée au fil à plomb ou à l'eau d'une rigole.

Relever les niveaux. Repérez la source et le point d'arrivée, puis mesurez la différence de hauteur. Un tuyau en plastique transparent rempli d'eau fait office de chorobate moderne : l'eau s'y tient à la même hauteur aux deux bouts. Plantez des piquets tous les quelques mètres sur le tracé et notez la hauteur de chacun.

Choisir la pente. Un canal lisse qui porte une eau claire demande en général quelques millimètres de pente par mètre ; dimensionnez-le pour le débit attendu et évitez les tronçons raides où l'eau filerait trop vite. Répartissez la pente aussi régulièrement que le terrain le permet et préférez un détour qui suit la courbe de niveau à une bosse qui arrêterait l'écoulement.

Creuser et poser le canal. Creusez la tranchée aux profondeurs marquées, tassez le fond et posez le canal : demi-tuyaux de terre cuite, rigole maçonnée enduite de mortier de chaux hydraulique ou de ciment, qu'on laisse durcir avant d'y faire passer l'eau, ou simple tuyau. Contrôlez la pente au tuyau d'eau à chaque raccord. En maçonnerie, rendez les joints étanches et arrondissez les angles intérieurs.

Ajouter un bassin de décantation. Juste après la source, construisez un petit bassin où l'eau ralentit et dépose son sable avant d'entrer dans le canal. Posez une grille contre les feuilles et un trop-plein pour qu'une crue ne fasse pas tout éclater.

Couvrir. Fermez le canal avec des dalles ou des tuiles. L'eau couverte reste plus propre et plus fraîche, et les algues y poussent moins.

> **Sécurité.** Les parois d'une tranchée peuvent s'effondrer, surtout en terrain meuble ou humide : étayez-les ou talutez-les avant de travailler dans une tranchée profonde, et n'y travaillez jamais seul. N'utilisez ni tuyaux ni soudure au plomb pour une eau que boiront des personnes ou des animaux, et considérez l'installation comme non potable : ne buvez pas son eau. Le mortier de chaux est caustique : portez gants et lunettes, et un masque antipoussière pour mélanger la chaux à sec. Tout bassin ouvert présente un risque de noyade pour les jeunes enfants : clôturez-le ou couvrez-le. Monter des arches ou des murs au-dessus de la tête, c'est travailler en hauteur avec de lourdes pierres : utilisez un vrai échafaudage et demandez conseil à un maçon.

Histoire et évolution

Les conduites d'eau sont bien plus anciennes que Rome. Le roi assyrien Sennachérib fit creuser, entre 703 et 690 av. J.-C. environ, un canal qui amenait l'eau à Ninive ; à Jerwan, il franchissait une vallée sur un pont de calcaire long de plus de 280 m, souvent présenté comme le plus ancien pont-aqueduc connu.

Le premier aqueduc de Rome, l'Aqua Appia, fut commencé en 312 av. J.-C. sous le censeur Appius Claudius Caecus, qui construisit aussi la via Appia. Il courait sur environ 16,5 km, presque entièrement sous terre. D'autres suivirent : l'Anio Vetus en 272 av. J.-C., l'Aqua Marcia en 144 av. J.-C., longue de plus de 90 km, puis l'Aqua Claudia et l'Anio

Novus, achevés en 52 apr. J.-C. À la fin du Ier siècle, l'empereur Nerva nomma Frontin curateur des eaux ; son traité recense neuf aqueducs desservant la ville, avec leurs longueurs et les fraudes qu'il y constata.

Le pont du Gard a sans doute été bâti entre 40 et 60 apr. J.-C. environ, certaines études prolongeant la fourchette jusqu'à 80. Ses trois rangs comptent 6, 11 et 35 arches ; 12 autres du rang supérieur ont disparu. Les gros blocs de calcaire de ses arches, dont certains pèsent jusqu'à 6 tonnes, sont posés sans mortier. L'aqueduc de Nîmes cessa de fonctionner à mesure que les dépôts et les racines l'obstruaient, probablement vers le VIe siècle. Le pont a survécu en partie parce qu'on l'utilisait pour franchir la rivière ; en 1743-1747, Henri Pitot accola un pont routier à son rang inférieur, et l'ouvrage est inscrit au patrimoine mondial depuis 1985.

Villes et monastères médiévaux construisirent des aqueducs plus modestes, et les réseaux modernes combinent canaux et tunnels gravitaires avec conduites sous pression, pompes et réservoirs. Une pente douce et constante règle encore les canaux, les égouts et les autres conduits où l'eau s'écoule par gravité.

Chiffres clés

Premier aqueduc de Rome
Aqua Appia, 312 av. J.-C., environ 16,5 km, presque entièrement souterrain

Pont du Gard
Environ 48 m de haut, trois rangs d'arches, bâti vers 40-60 apr. J.-C.

Aqueduc de Nîmes
Environ 50 km pour 12 à 13 m de dénivelé (environ 25 cm par km)

Débit estimé à Nîmes
Environ 20 000 à 40 000 m^3 par jour (les estimations varient)

Sources

1. Jerwan Aqueduct · Columbia University, Media Center for Art History https://mcid.mcah.columbia.edu/mapping-mesopotamian-monuments/jerwan-aqueduct
2. Frontinus, De aquis urbis Romae, Book I (trans. R. H. Rodgers) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Frontinus/De_Aquis/Rodgers/1**.html
3. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book VIII · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/8*.html
4. Pont du Gard · Structurae https://structurae.net/fr/ouvrages/pont-du-gard
5. Nîmes: the castellum · Archaeology Magazine (Archaeological Institute of America) https://archive.archaeology.org/onsite/provence/nimes2.html
6. Pont du Gard · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard
7. Roman hydraulic engineering: the Pont du Gard aqueduct and Nemausus (Nîmes) castellum (Water, 2021) · MDPI https://www.mdpi.com/2073-4441/13/1/54
8. Hydraulics of Roman aqueducts: myths, fables, realities · University of Queensland (H. Chanson) https://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/rom_aq.html
9. Pont du Gard · Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard
10. Manning's n table (after Chow, Open-channel hydraulics, 1959) · San Diego State University (V. M. Ponce) https://ponce.sdsu.edu/open_channel_hydraulics_05_manningsntable.html

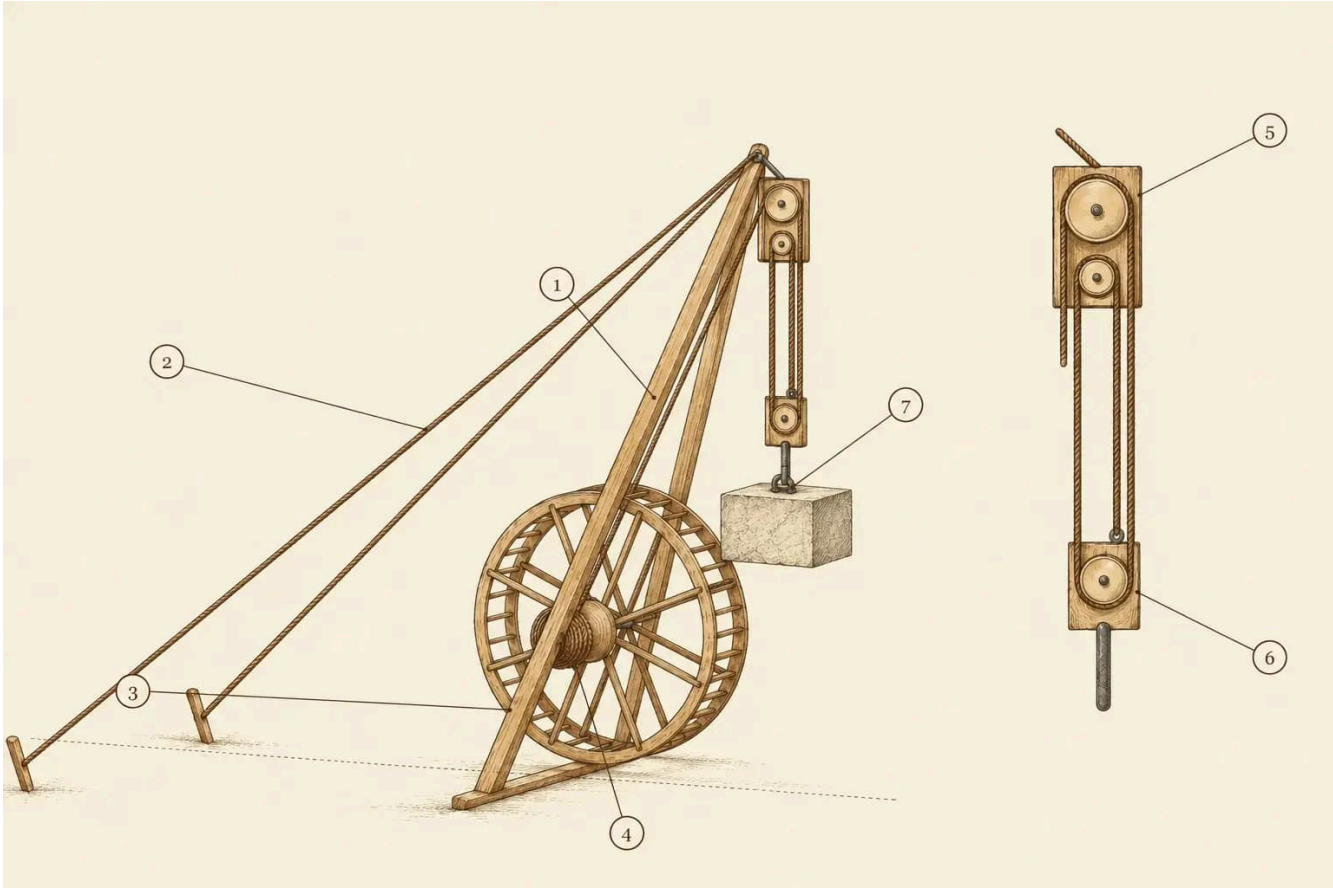
Faits vérifiés le 2026-10-12

Grue & poulie

Soulever plus que son propre poids

v. 515 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Corde & cordage (p. 13), Roue & essieu (p. 83)



1 Jambe du bâti en bois 2 Hauban 3 Roue à cage 4 Tambour d'enroulement 5 Moufle supérieure à deux poulies 6 Moufle inférieure à une poulie 7 Louve engagée dans la pierre

Une grue soulève une charge en échangeant de la distance contre de la force : une corde passe dans plusieurs poulies et s'enroule sur un tambour mû par un treuil ou une roue à cage, si bien que quelques personnes lèvent une pierre plusieurs fois plus lourde qu'elles. Les bâtisseurs grecs l'employaient dès la fin du VIe siècle av. J.-C., et ceux de Rome et du Moyen Âge s'en sont servis pour bâtir temples et cathédrales et pour charger les navires.

Ce que c'est

Une grue est une charpente qui tient une charge en l'air pendant qu'on la soulève, à bras ou au moteur. La grue antique comptait trois éléments : une charpente ou un mât tenu par des haubans, un jeu de poulies à son sommet et un treuil à sa base. Le treuil était un axe horizontal manœuvré avec des leviers, ou une grande roue dans laquelle marchaient des hommes, la roue à cage.

Chacun de ses éléments, le levier, la roue et la corde, est plus ancien que la grue. Elle les combine pour que la petite force de quelques personnes, appliquée sur une longue distance, devienne une grande force sur une

courte distance.

Comment ça marche

Une poulie fixe seule ne fait que changer la direction de l'effort. Le gain apparaît quand la charge pend à une poulie mobile. La corde la tient alors par deux brins, et chacun porte la moitié du poids. Pour lever la pierre d'un mètre, il faut tirer deux mètres de corde, mais avec moitié moins d'effort.

Le palan le plus simple : deux brins portent la poulie mobile, et il suffit de tirer environ la moitié du poids.

Ajoutez des poulies aux deux moufles et la charge se répartit sur plus de brins. Vitruve, à la fin du Ier siècle av. J.-C., nomme les palans d'après leur nombre de poulies : trois pour le trispastos, cinq pour le pentaspastos, un grand nombre pour le polyspastos. Avec cinq brins, un effort égal au poids de 20 kg retient environ 100 kg, frottements non compris. Le frottement des axes reprend une partie du gain, et d'autant plus qu'on ajoute des poulies.

Le treuil multiplie la force une seconde fois. Une corde enroulée sur un axe mince tourné par de longs leviers agit comme un treuil à roue : si les leviers sont dix fois plus longs que le rayon de l'axe, la force sur la corde vaut dix fois celle exercée sur les leviers. La roue à cage fonctionne de même, avec pour effort le poids des hommes qui marchent dedans. Pour les charges très lourdes, Vitruve décrit un tambour assez large pour que des hommes y marchent, plus puissant qu'un cabestan.

Tenailles de levage grecques : en tirant sur l'anneau, on serre les pointes dans les encoches taillées dans le bloc.

Encore faut-il tenir la charge. Les bâtisseurs grecs taillaient dans leurs blocs des trous ou des rainures en U pour les cordes, utilisaient des tenailles de fer dont les pointes entraient dans des trous latéraux, ou plaçaient une louve, un coin de fer en queue d'aronde, dans un trou creusé sur le dessus. Ces entailles, encore visibles sur les pierres des temples, sont la principale preuve de l'emploi des grues. Vitruve décrit des tenailles de fer suspendues sous la moufle inférieure, dont les dents entrent dans des trous de la pierre. Les grues de chantier de ce type avaient peu de portée latérale : on déposait donc le bloc près de sa place et on l'y poussait au levier.

Comment la fabriquer

Une maquette de table montre comment poulies et treuil multiplient la force. Gardez-la petite : c'est une démonstration, pas un appareil de levage.

Monter la charpente. Liez près du sommet deux tourillons ou manches à balai d'environ 1 m, écartez leurs pieds d'environ 50 cm sur une planche de base et vissez-les. Serrez la planche sur une table solide avec des serre-joints pour que la maquette ne puisse pas basculer, et tendez deux cordelettes du sommet à des pitons à l'arrière de la planche, pour que la charpente penche légèrement vers l'avant tout en gardant la charge au-dessus de la planche.

Gréer le palan. Suspendez au sommet une petite moufle à deux réas et, en dessous, une moufle à un réa. Attachez une cordelette solide au haut de la moufle inférieure, passez-la sur un réa du haut, sous le réa du bas, puis sur le

second réa du haut. Trois brins portent désormais la moufle inférieure.

Ajouter un treuil. Percez chaque pied près du bas et passez dans les deux trous un court tourillon qui tourne librement ; collez une manivelle à un bout ; l'extrémité libre de la cordelette sera attachée au milieu après le premier essai ci-dessous. Percez dans un pied un trou pour une cheville amovible : cheville en place, la manivelle s'appuie contre elle et retient la charge. Gardez la main sur la manivelle chaque fois que vous retirez la cheville pour continuer à enrouler.

Mesurer le gain. Faites ce premier essai avant d'attacher la cordelette au tourillon. Pesez la moufle inférieure, puis accrochez-y un sac de sable de 500 g au plus. Tirez lentement et régulièrement sur le bout libre avec un peson, en ne levant le sac que de quelques dizaines de centimètres : vous devez lire un peu plus du tiers du poids du sac et de la moufle réunis ; le reste est du frottement. Reposez le sac, attachez la cordelette au milieu du tourillon et comparez la course de la manivelle à la hauteur dont monte le sac.

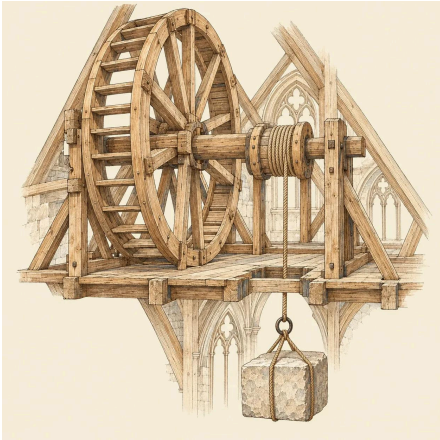
> **Sécurité.** Gardez la main sur la manivelle tant que la charge est levée : un simple axe repart en arrière dès qu'on le lâche. Placez la maquette là où un sac qui tombe ne peut atteindre ni mains ni pieds, et tenez les doigts à l'écart des poulies et de l'axe d'enroulement. N'agrandissez pas la maquette pour lever des objets lourds : un vrai levage exige du matériel homologué pour lever et descendre des charges suspendues, utilisé par des personnes formées à l'élingage.

Histoire et évolution

La poulie apparaît sur un relief assyrien du IXe siècle av. J.-C. Au VIIe siècle av. J.-C., des bâtisseurs grecs creusaient des rainures pour les cordes dans des blocs de 200 à 400 kg à Isthmia et à Corinthe, et certains chercheurs pensent qu'on essayait déjà des bâtis de levage. Les grues deviennent courantes sur les chantiers grecs vers 515 av. J.-C., quand apparaissent les entailles pour tenailles et pour louves sur des temples comme celui d'Apollon à Delphes. La première description écrite claire du palan se trouve dans les Problèmes mécaniques, un texte grec du début du IIIe siècle av. J.-C.

Les bâtisseurs romains utilisaient à la fois le treuil et la roue à cage. Un relief du tombeau de la famille des Haterii, à Rome, sculpté vers 100 apr. J.-C., montre une grue à roue en action. D'après des estimations modernes, qui supposent un palan de trois rangées de cinq poulies, la plus grande grue à palans, le polyspastos, levait environ 3 tonnes avec quatre hommes au treuil, et environ 6 tonnes avec une roue à cage. Les plus lourds blocs romains, comme les architraves de Baalbek, demandaient plusieurs grues ou d'autres moyens.

Les roues à cage réapparaissent dans les comptes de chantiers français vers 1225, et des grues portuaires sont attestées à Utrecht en 1244, à Anvers en 1263 et à Bruges en 1288. Les bâtisseurs gothiques installaient souvent leurs treuils sur la charpente, au-dessus des voûtes en construction, et plusieurs roues à cage médiévales subsistent dans des tours d'églises anglaises. La grande grue du port de Gdańsk, bâtie en 1442-1444, a brûlé en 1945, et sa charpente a été reconstruite. En 1586, Domenico Fontana dressa l'obélisque du Vatican, estimé entre 330 et 360 tonnes, avec une tour de levage en bois. Dès 1801, deux machines à vapeur actionnèrent les grues du chantier des docks de Londres, et dans les années 1840 William Armstrong construisit des grues hydrauliques mues par l'eau ; le moteur électrique et les flèches d'acier vinrent ensuite, mais les grues lèvent toujours avec des moufles et un tambour.



Une roue à cage médiévale installée au-dessus des voûtes : la corde descend du tambour par une ouverture du plancher.

Chiffres clés

Plus ancien indice sûr

Entailles de levage sur des blocs de temples grecs, vers 515 av. J.-C.

Grue du port de Gdańsk

Bâtie en 1442-1444, charpente reconstruite après 1945

Polyspastos romain (estimation moderne)

Environ 3 t avec quatre hommes au treuil, environ 6 t avec une roue à cage

Obélisque du Vatican, 1586

Environ 330 à 360 t (estimations variables), dressé par Domenico Fontana

Sources

1. J. J. Coulton, Lifting in early Greek architecture (Journal of Hellenic Studies 94, 1974) · Society for the Promotion of Hellenic Studies (copy hosted by the University of Athens) https://eclass-b.uoa.gr/modules/document/file.php/BAAG112/630416_Lifting%20in%20Early%20Greek%20Architecture_Coulton_Journal%20of%20Hellenic%20Studies1974.pdf
2. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book X (hoisting machines) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
3. Greek temple ruins suggest lifting machines in use 1.5 centuries earlier than previously believed · University of Notre Dame, via Newswise https://www.newswise.com/articles/greek-temple-ruins-suggest-lifting-machines-in-use-1-5-centuries-earlier-than-previously-believed
4. Rochester Bridge Trust magazine: John Rennie and the London Dock (steam engines working the construction cranes, 1801) · Rochester Bridge Trust https://rbt.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/RBT-40pp-A4-Magazine-Single-Pages-Updated.pdf
5. Crane (machine) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Crane_(machine)
6. Treadwheel crane · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Treadwheel_crane
7. Treadwheel crane, Harwich (built 1667): wheels of 16 ft on an axle of 13½ in · The Harwich Society https://www.harwich-society.co.uk/maritime-heritage-trail/treadwheel-crane/
8. Block and tackle (friction: the sheave friction factor of API RP 9B) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Block_and_tackle
9. Human power (sustained output of a labourer, after Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Human_power

Faits vérifiés le 2026-10-12

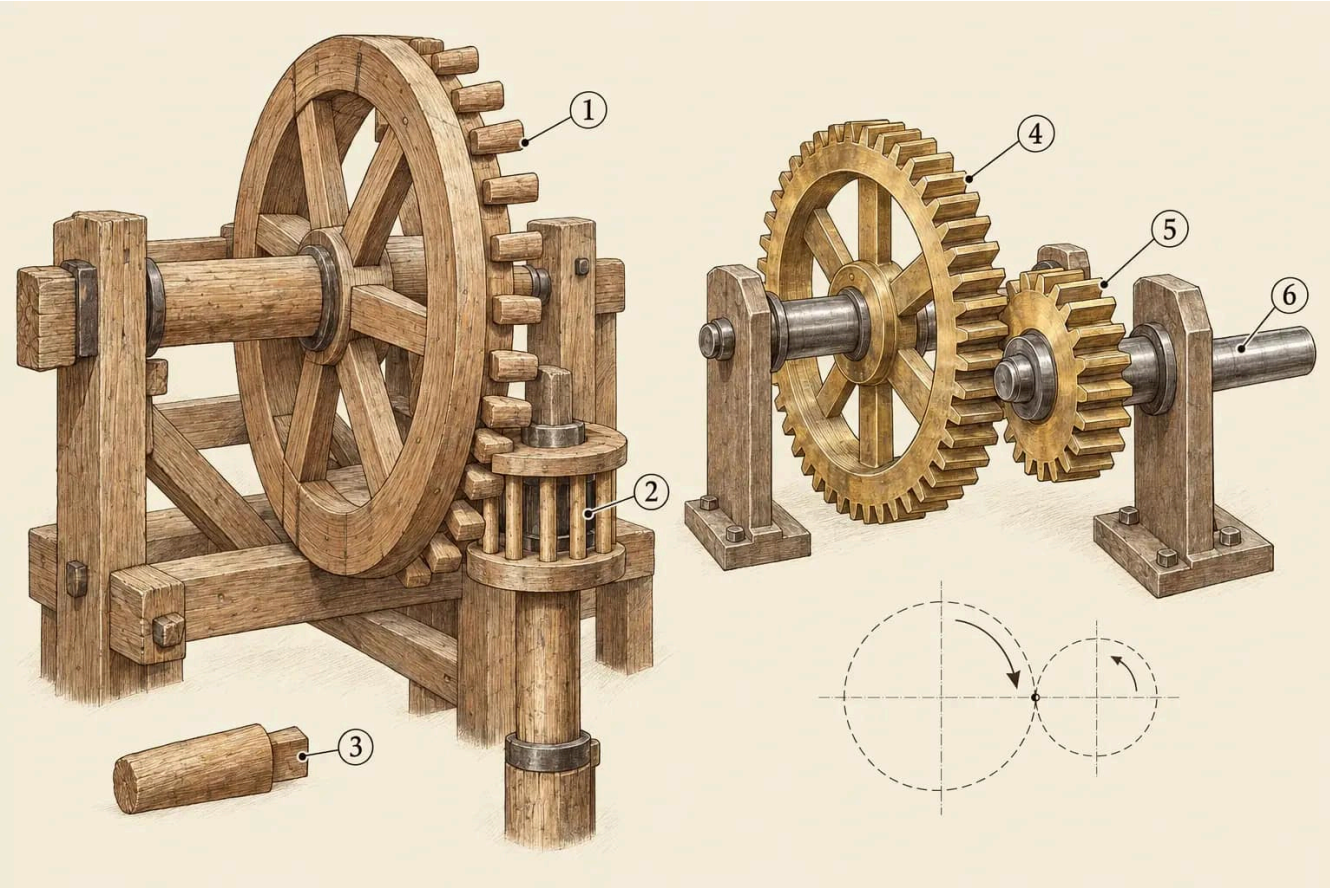
Engrenages

Des dents qui échangent vitesse et force

v. 300 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite: Bronze (p. 125)

Mène à: Horloge mécanique (p. 203), Machine à coudre (p. 272), Machine à vapeur (p. 229), Roue hydraulique (p. 159), Moulin à vent (p. 188)



1 Rouet à alluchons de bois 2 Lanterne 3 Alluchon de rechange 4 Roue droite 5 Pignon 6 Arbre

Un engrenage est un ensemble de roues dentées dont les dents s'emboîtent, si bien qu'un arbre en entraîne un autre sans glisser. En choisissant le nombre de dents, on échange vitesse contre force, on change le sens du mouvement ou l'on tient un rapport exact.

Ce que c’est

Une roue dentée porte des dents sur son pourtour. Un engrenage réunit des roues dont les dents s’engagent les unes dans les autres: l’une entraîne l’autre sans glisser, dans les moulins comme dans les horloges ou les boîtes de vitesses.

Un petit pignon qui mène une grande roue la fait tourner plus lentement, mais avec plus de force de rotation, le couple. Deux roues droites engrenées tournent en sens contraires, et un rouet ou un engrenage conique renvoie le mouvement à angle droit. Comme les dents ne peuvent pas glisser, un train d’engrenages garde aussi son rapport pendant des années: c’est ce qu’il faut à une horloge.

Comment ça marche

Prenons deux roues de 60 et 15 dents. À chaque dent de la grande roue qui passe au point de contact correspond une dent du pignon : un tour de la grande roue fait donc quatre tours du pignon. Le rapport des vitesses est le rapport des nombres de dents. La puissance se conserve, au frottement près, donc le couple varie en sens inverse : le pignon tourne quatre fois plus vite avec quatre fois moins de couple.

La planche montre deux familles. À gauche, l'engrenage en bois d'un moulin : un rouet, dont les dents en bois appelées alluchons sont plantées sur une face de la jante, entraîne une lanterne faite de fuseaux ronds pris entre deux plateaux. Un alluchon usé se chasse et se remplace seul. À droite, des roues droites en métal à dents profilées, sur des arbres parallèles.

Avec de simples chevilles, la roue menée accélère et ralentit un peu à chaque dent qui entre en prise puis s'échappe, d'où bruit, vibrations et usure. Pour un rapport régulier, la poussée entre deux dents doit toujours passer par le même point de la ligne qui joint les arbres, ce qui impose la forme des flancs. La cycloïde, longtemps employée en horlogerie, y parvient. La développante de cercle aussi : c'est la courbe que décrit le bout d'un fil tendu que l'on déroule d'un cercle. Les engrenages à développante gardent leur rapport même si les arbres sont un peu trop écartés, et ils sont plus faciles à tailler. Presque tous les engrenages modernes l'utilisent.

À chaque tour de la vis, la roue n'avance que d'une dent.

Une vis sans fin engrène avec une roue dentée. Elle peut avoir un ou plusieurs filets. Celle du dessin n'en a qu'un et fait avancer la roue d'une dent par tour, soit une réduction de 30 à 1 avec une roue de 30 dents. La possibilité pour la roue d'entraîner la vis en retour dépend de la géométrie et du frottement. Les vibrations peuvent faire perdre l'autoblocage : les palans et les treuils de levage doivent donc avoir un frein indépendant qui retient la charge. La crémaillère, une barre droite dentée, change la rotation en mouvement rectiligne.

Comment les construire

Des engrenages métalliques précis demandent un tour avec plateau diviseur ou une machine à tailler. Un rouet et une lanterne en bois, décrits ici, se font avec des outils à main.

Choisir le rapport. Fixer le nombre de dents selon la vitesse voulue, par exemple 45 alluchons et 8 fuseaux, soit environ 5,6 pour 1. Des nombres sans diviseur commun répartissent l'usure, car chaque alluchon rencontre tour à tour chaque fuseau.

Tracer le pas. Alluchons et fuseaux doivent être espacés exactement de la même distance, le pas, mesurée sur leurs cercles primitifs. Diviser le cercle au compas : un millimètre d'erreur par pas s'additionne sur tout le tour.

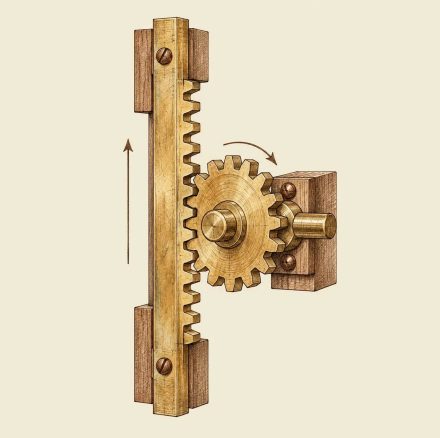
Faire la roue. Monter la jante en bois dur bien sec, le chêne par exemple, en segments croisés pour que le fil suive la courbe, et la fixer sur des bras qui traversent l'arbre par des mortaises. Percer à chaque repère et y chasser des alluchons d'un bois dense et tenace, avec un tenon qui traverse la jante et se coince par derrière. Arrondir les extrémités des alluchons qui travaillent au contact des fuseaux.

Faire la lanterne. Fixer deux plateaux sur l'arbre, les percer sur le même cercle primitif et y chasser des fuseaux ronds.

Régler l'engrènement. Monter les deux arbres sur des paliers solides, de sorte que les alluchons pénètrent à mi-profondeur entre les fuseaux, avec un peu de jeu. Tourner lentement à la main, marquer les points durs à la craie et les reprendre. Graisser les dents au suif.

> **Sécurité.** Des engrenages en prise happent doigts, cheveux et vêtements amples à l'endroit où les dents se rejoignent. Poser un carter, attacher cheveux et manches, et ne jamais passer la main dans un engrenage qui peut tourner : arrêter et bloquer l'entraînement d'abord.

Histoire et évolutions



Pignon et crémaillère : la rotation devient mouvement rectiligne.

Les *Problèmes mécaniques*, rédigés dans l'école d'Aristote vers 280 av. J.-C., décrivent des roues en contact qui tournent en sens contraires, sans parler de dents ; il pouvait s'agir de roues lisses entraînées par frottement. Les plus anciens engrenages conservés sont de petites roues métalliques chinoises du IVe siècle av. J.-C. (Royaumes combattants), gardées au musée de Luoyang.

À Alexandrie, au IIIe siècle av. J.-C., Ctésibios construit une horloge à eau dans laquelle un flotteur qui monte entraîne une règle et des tambours à dents égales, selon Vitruve. On attribue à Archimède la vis sans fin, vers 250 av. J.-C.

Le plus grand fragment de la machine d'Anticythère, avec sa roue principale à quatre rayons.

En 1901, des plongeurs découvrent dans une épave, au large de l'île grecque d'Anticythère, le mécanisme à engrenages le plus complexe de l'Antiquité. Fabriquée au IIe ou au Ier siècle av. J.-C., la machine subsiste en 82 fragments qui renferment 30 roues dentées en bronze, environ un tiers de l'ensemble. Actionnée à la main, elle indiquait la position du Soleil, de la Lune et des planètes et prédisait les éclipses.

Vers 25 av. J.-C., Vitruve décrit un moulin à eau dans lequel un tambour denté monté sur l'axe de la roue entraîne une roue horizontale plus grande, qui fait tourner la meule. Rouets et lanternes de ce genre entraînent les moulins pendant les quinze siècles suivants. Les horloges mécaniques se répandent en Europe à partir de 1300 environ. La construction de l'astrarium de Giovanni de' Dondi est traditionnellement datée de 1348–1364, mais cette datation est discutée : le musée des sciences et des techniques de Milan propose 1365–1380. Dans les années 1490, Léonard de Vinci dessine des profils de dents dans les carnets aujourd'hui appelés Codex de Madrid.

Philippe de La Hire analyse les courbes des dents vers 1694, et vers 1754 Leonhard Euler énonce la règle que les dents doivent suivre pour un rapport régulier. Au XIXe siècle, les engrenages en fonte puis en acier taillé à la machine font tourner les usines, et la développante remplace la cycloïde dans la plupart des machines.

Chiffres clés

Rapport de vitesse

Fixé par le nombre de dents : 60 dents menant 15 font tourner le pignon 4 fois plus vite

Machine d'Anticythère

30 roues dentées en bronze conservées, IIe ou Ier siècle av. J.-C.

Plus anciens engrenages conservés

Chine, période des Royaumes combattants (IVe siècle av. J.-C.)

Théorie des dentures

La Hire (vers 1694) et Euler (vers 1754) établissent les courbes d'un rapport régulier

Sources

1. Gear · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gear
2. A Model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism (Freeth et al., 2021) · Scientific Reports https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7955085/
3. Geared power transmission technology (J. J. Coy, 1983) · NASA Technical Reports Server https://ntrs.nasa.gov/citations/19830011851
4. Vitruvius, De architectura, Book IX, chap. 8 (Ctesibius's water clock) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/9*.html
5. Vitruvius, De architectura, Book X, chap. 5 (water wheels and mills) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
6. Self-locking of worm gear reducers · Tsubakimoto Chain https://tt-net.tsubakimoto.co.jp/tecs/engd/gen/engd_gen_ggm_gis_sfl.asp?lang=en
7. KWG Ground Worms and Worm Wheels: specifications · KHK Gears https://khkgears.net/pdf/kwg.pdf
8. L'Astrario di Giovanni Dondi · Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci https://artsandculture.google.com/story/l%E2%80%99astrario-di-giovanni-dondi-museo-nazionale-della-scienza-e-della-tecnologia-leonardo-da-vinci/0gURs225ZTyrJA?hl=it
9. Engrenage · Office québécois de la langue française https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2091942/engrenage
10. Machinists' and Draftsmen's Handbook (Lobben, 1910), p. 325: a derrick crab worked out · Project Runeberg https://runeberg.org/lobben/0345.html
11. Effect of geometry and operating conditions on spur gear system power loss (Anderson and Loewenthal, NASA TM-81426, 1980) · NASA Technical Reports Server https://ntrs.nasa.gov/citations/19800010132
12. Human power: comfortable one-hand cranking (Jansen and Slob, ICED 03, 2003) · The Design Society https://www.designsociety.org/download-publication/23972/human_power_comfortable_one-hand_cranking

Faits vérifiés le 2026-10-12

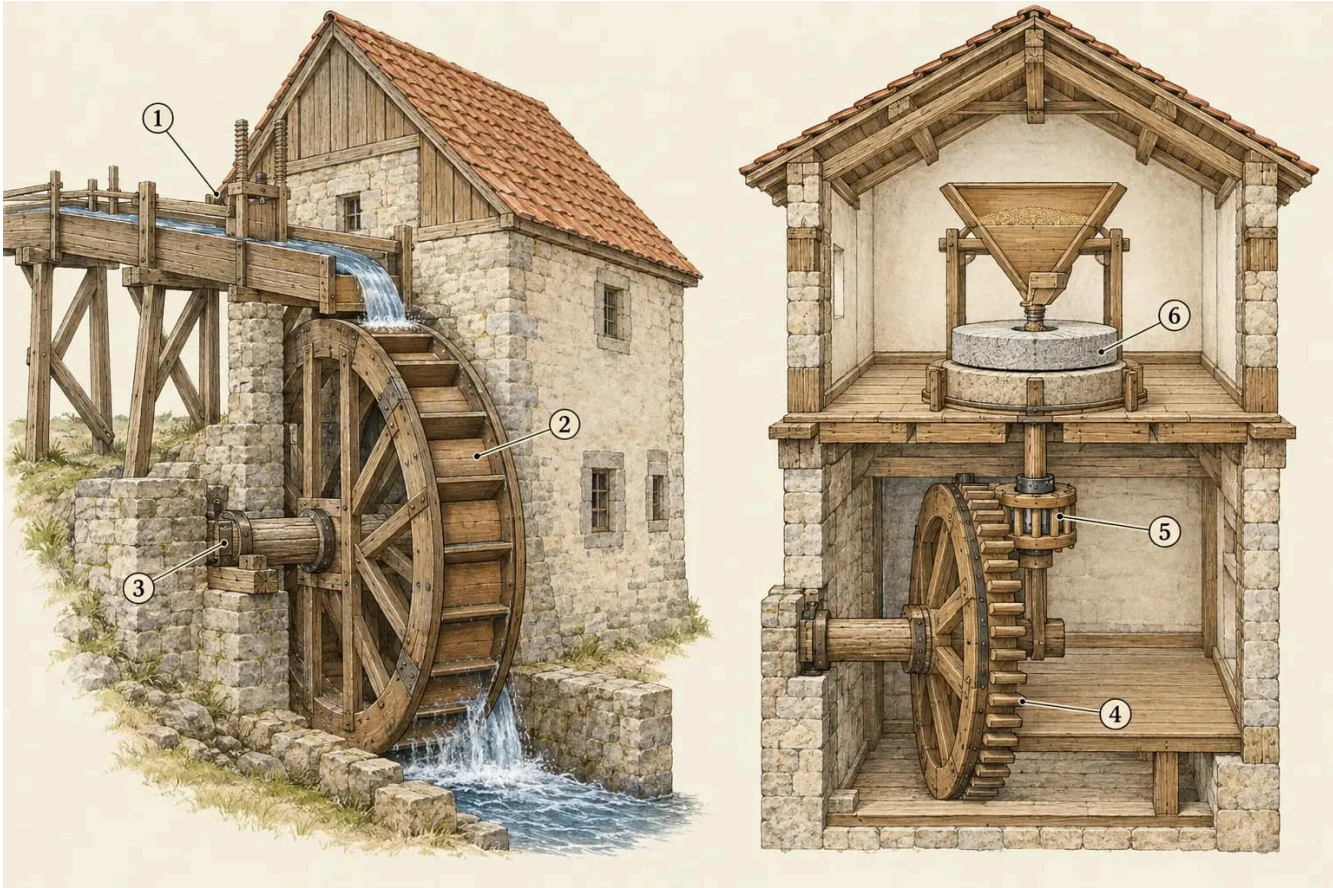
Roue hydraulique

Une rivière changée en travail

v. 300 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Roue & essieu (p. 83), Engrenages (p. 155)

Mène à : Turbine hydraulique (p. 267), Moulin à vent (p. 188)



1 Coursier et vanne 2 Augets 3 Arbre de la roue 4 Rouet 5 Lanterne 6 Meules

Une roue hydraulique transforme le courant ou la chute d'une eau en rotation, que des engrenages transmettent à des meules, des marteaux, des soufflets ou des pompes. Du IIIe siècle av. J.-C. au XIXe siècle, elle a été la principale source d'énergie mécanique après la force des humains et des animaux.

Ce que c'est

Une roue hydraulique est une roue garnie de pales ou d'augets que l'eau en mouvement fait tourner, et son arbre entraîne des machines. Pendant deux mille ans, elle a moulu le grain ; au Moyen Âge, elle foule aussi le drap, scie le bois, actionne soufflets et marteaux de forge et pompe l'eau des mines.

Une roue en dessous plonge ses aubes dans le courant, qui les pousse. Les modèles traditionnels simples se passent de barrage et ne convertissent en travail qu'une faible part de l'énergie disponible. Une roue en dessus, celle de cette planche, reçoit l'eau par le haut depuis un canal et tourne sous le poids de l'eau dans ses augets. Il lui faut une chute au moins aussi haute qu'elle. Une dénivellation naturelle, une prise d'eau et un canal peuvent suffire ; le barrage et l'étang sont facultatifs. La roue de poitrine reçoit l'eau à hauteur de l'axe. Le rendement

dépend de la construction et de l'alimentation en eau ; les roues en dessous améliorées peuvent aussi atteindre un bon rendement.

Une roue en dessous : le courant pousse les aubes les plus basses.

Comment ça marche

L'eau retenue en hauteur stocke de l'énergie. Le coursier (1), une auge en bois, l'amène au sommet de la roue, et une vanne permet au meunier de mettre la roue en marche, de l'arrêter et d'en régler la vitesse. L'eau tombe dans les augets (2) du côté qui descend. Ce côté alourdi entraîne la roue, lentement, à quelques tours par minute. Les augets gardent leur eau le plus longtemps possible et ne la vident que près du bas, dans le canal de fuite.

La puissance hydraulique disponible se calcule par $P = \rho g Q H$: masse volumique de l'eau ρ, accélération de la pesanteur g, débit volumique Q et hauteur de chute H. Avec une masse volumique d'environ 1 000 kg/m^3 et g = 9,81 m/s^2, un débit de 100 litres par seconde (0,1 m^3/s) et une chute de quatre mètres donnent environ 3,92 kW avant les pertes. Une roue en dessus bien construite en transforme la plus grande partie en travail sur son arbre.

Dans le moulin à roue horizontale, pas d'engrenage : l'arbre de la roue est l'axe de la meule.

Dans le moulin, l'arbre (3) porte le rouet (4), une grande roue dentée dont les alluchons entraînent la petite lanterne (5) montée sur un arbre vertical. Comme dans un moulin à vent, le mouvement passe de l'horizontale à la verticale et s'accélère, car la roue est lente alors que la meule du dessus doit tourner bien plus vite. Cette meule courante (6) écrase le grain, versé par une trémie, contre la meule gisante fixe placée dessous.

Certains moulins n'ont aucun engrenage. Dans le moulin à roue horizontale, longtemps employé en Irlande, en Scandinavie et autour de la Méditerranée, une petite roue couchée sous le plancher reçoit le jet d'une goulotte très inclinée, et son arbre vertical fait tourner directement la meule courante. Les modèles traditionnels simples coûtent peu et ne convertissent en travail qu'une part relativement faible de l'énergie disponible. Les roues horizontales améliorées peuvent atteindre un rendement élevé.

Comment la construire

Ces grandes lignes concernent une petite roue en dessus qui entraîne une pompe ou une machine légère. Prélever l'eau d'un ruisseau demande en général une autorisation.

Trouver la chute. Chercher un ruisseau avec une dénivellation d'au moins deux mètres. Creuser un canal d'amenée, le bief, qui quitte le ruisseau en amont avec une pente très faible, pour arriver à la roue bien au-dessus du lit.

Dimensionner la roue. Lui donner un diamètre un peu inférieur à la chute. Sa largeur dépend du débit. Des augets remplis en partie seulement débordent moins tôt.

Faire l'arbre et les bras. Prendre un arbre en chêne, équarri là où se fixent les bras, avec des tourillons en fer aux extrémités, tournant dans des paliers en bois dur ou en bronze posés sur des piles de pierre ou de béton.

Monter les couronnes et les augets. Fixer les augets en biais entre deux couronnes de planches et fermer le côté intérieur par des planches. Tremper la roue avant usage pour que le bois gonfle et que les joints deviennent étanches.

Poser le coursier et la vanne. Amener l'eau au sommet de la roue dans une auge en bois sur chevalets, avec une vanne coulissante et un déversoir qui envoie l'eau à côté de la roue quand elle est arrêtée. Vérifier l'équilibre de la roue, puis ouvrir la vanne progressivement.

> **Sécurité.** Une roue chargée est lourde et ne s'arrête pas d'un coup : ne jamais monter dessus ni y passer la main quand elle tourne. Avant toute intervention, couper l'alimentation en eau, verrouiller la vanne pour empêcher sa réouverture et détourner les fuites éventuelles de la roue. Vérifier l'arrêt complet. Depuis un endroit sûr, évacuer l'eau retenue et immobiliser la roue et les machines entraînées avec des dispositifs adaptés aux charges restantes, afin que l'énergie stockée ne puisse les mettre en mouvement. Faire établir et vérifier cette isolation par une personne compétente. L'eau rapide d'un canal peut renverser et noyer un adulte : clôturer le canal de fuite et ne jamais y travailler seul. Poser des carters sur tous les engrenages accessibles pour empêcher les mains et les vêtements de les atteindre.

Histoire et évolutions

Les premières roues élevaient l'eau. Au IIIe siècle av. J.-C., Philon de Byzance décrit une roue à compartiments servant à l'irrigation en Égypte. Selon l'historien M. J. T. Lewis, les moulins à grain hydrauliques apparaissent au cours du même siècle, d'abord à axe vertical, puis à axe horizontal. La première description claire d'un moulin à eau à engrenages est celle de Vitruve, vers 25 av. J.-C. : une roue en dessous entraîne la meule par un tambour denté et une roue horizontale plus grande.

À Barbegal, près d'Arles, les Romains installent seize roues en dessus sur deux rangées de huit, en gradins sur le flanc d'une colline, alimentées par un aqueduc. Le complexe est construit au IIe siècle apr. J.-C. En Chine, Du Shi actionne à l'énergie hydraulique les soufflets des fonderies de fer en 31 apr. J.-C.

En Afrique du Nord et au Proche-Orient, la noria, grande roue à pots mue par le courant, monte l'eau dans des canaux d'irrigation et alimente les villes. Au Xe siècle, le médecin al-Razi en décrit une, en Irak, qui élève environ 153 000 litres à l'heure.

Une noria : le courant fait tourner la roue, et la roue soulève une partie de la rivière.

Les moulins à eau se multiplient dans l'Europe médiévale. Le Domesday Book de 1086 en recense environ six mille en Angleterre, et les roues finissent par entraîner foulons, scies, soufflets de forge et marteaux.

Dans les années 1750, l'ingénieur anglais John Smeaton essaie des modèles réduits de roues. À énergie hydraulique disponible comparable, ses modèles en dessus fournissent au moins deux fois le travail de ses modèles en dessous. Il publie ses résultats en 1759. Ce rapport concerne les modèles testés ; il ne vaut pas pour toutes les roues hydrauliques. La roue de Laxey, sur l'île de Man, achevée en 1854 pour pomper l'eau des mines de Laxey, mesure 22,1 mètres de

diamètre. À partir de 1827, la turbine de Benoît Fourneyron commence à remplacer la roue, et les turbines des centrales hydroélectriques en descendent.

Chiffres clés

Première description
Philon de Byzance, IIIe siècle av. J.-C. (une roue élévatoire)

Angleterre, 1086
Environ 6 000 moulins recensés dans le Domesday Book

Par-dessus ou par-dessous
Roue en dessus au moins deux fois plus efficace dans les essais de Smeaton, à énergie hydraulique disponible comparable (1759)

Plus grande roue en service
Laxey, île de Man : 22,1 m de diamètre, achevée en 1854

Sources

1. Water wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel
2. Vitruvius, De architectura, Book X, chap. 5 (water wheels and mills) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
3. The Scientists, the Engineers, and the Water Wheel · JSTOR Daily https://daily.jstor.org/the-scientists-the-engineers-and-the-water-wheel
4. Great Laxey Wheel · Manx National Heritage https://manxnationalheritage.im/?p=18117
5. John Smeaton · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/John_Smeaton
6. Providing and using work equipment safely: A brief guide · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pubns/indg291.pdf
7. The second century CE Roman watermills of Barbegal: Unraveling the enigma of one of the oldest industrial complexes · Science Advances, American Association for the Advancement of Science https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6124920/
8. Waterwheel · Energy Education, University of Calgary https://www.energyeducation.ca/encyclopedia/Waterwheel
9. Gravity water wheels as a micro hydropower energy source: A review based on historic data, design methods, efficiencies and modern optimizations · Politecnico di Torino, institutional repository https://iris.polito.it/handle/11583/2712517
10. High hydraulic performance in horizontal waterwheels · Universitat de Girona, Research Portal https://recerca.udg.edu/en/publications/high-hydraulic-performance-in-horizontal-waterwheels/

Faits vérifiés le 2026-10-12

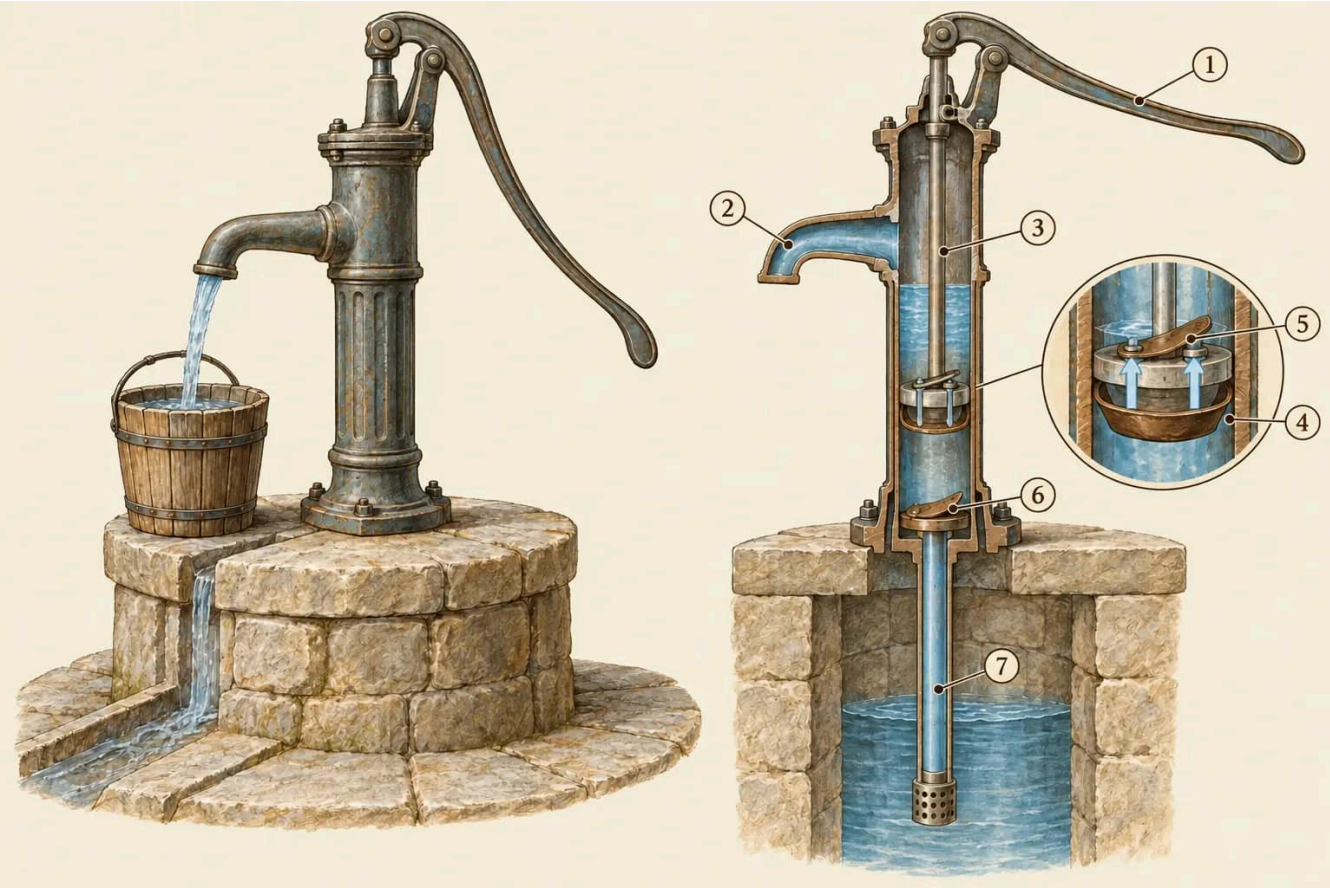
Pompe à piston

L'eau montée par piston et clapets

v. 270 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Bronze (p. 125), Tannage du cuir (p. 103)

Mène à : Réfrigération (p. 284), Machine à vapeur (p. 229)



1 Balancier 2 Bec verseur 3 Tige de piston 4 Cuir embouti 5 Clapet du piston 6 Clapet de pied 7 Tuyau d'aspiration

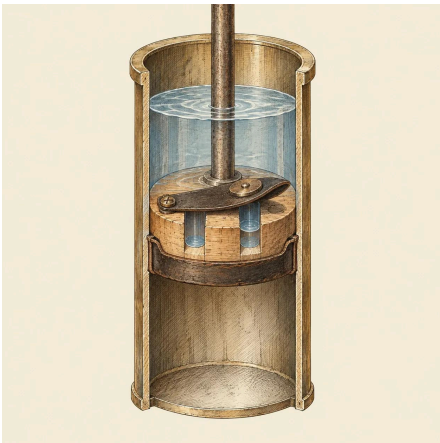
Une pompe à piston déplace l'eau avec un bouchon qui coulisse dans un cylindre, entre deux clapets qui ne la laissent passer que dans un sens. On attribue la pompe foulante à Ctésibios d'Alexandrie, au IIIe siècle av. J.-C. ; la pompe aspirante, qui tire l'eau d'en dessous, s'est répandue en Europe à la fin du Moyen Âge, puis sur les puits des villages du monde entier.

Ce que c’est

Une pompe à piston déplace l’eau avec un bouchon qui monte et descend dans un tube, entre deux clapets qui ne s’ouvrent que dans un sens. Depuis plus de deux mille ans, elles assèchent les mines, alimentent les fontaines, combattent le feu et tirent l’eau des puits.

La pompe aspirante, dite aussi élévatoire, se tient au-dessus de l’eau et la fait monter dans un tuyau. La pompe foulante est placée dans l’eau, ou plus bas que sa sortie, et refoule l’eau sous pression. La planche montre une pompe aspirante du XIXe siècle sur un puits de village fermé.

Comment ça marche



À la montée, l'eau qui pèse dessus tient le clapet fermé; à la descente, il se soulève et l'eau traverse le piston.

Au fond du cylindre se trouve le clapet de pied, un rabat de cuir ou de caoutchouc qui se soulève pour laisser entrer l'eau puis retombe sur son siège. Le piston porte un second clapet au-dessus de trous qui le traversent, et un cuir embouti sur son pourtour. Ouvert vers le haut, ce cuir est plaqué contre la paroi par l'eau.

Quand le balancier tire le piston, son clapet reste fermé et l'eau posée dessus monte jusqu'au bec. Sous le piston, la pression baisse, et l'air qui pèse sur la surface du puits pousse l'eau dans le tuyau d'aspiration, à travers le clapet de pied. À la descente, le clapet de pied se ferme, celui du piston s'ouvre, et le piston traverse l'eau.

Côté aspiration, c'est l'atmosphère qui travaille, et sa poussée a une limite. Au niveau de la mer, le poids de l'air équilibre une colonne d'eau d'environ 10,3 mètres, ou 76 centimètres de mercure. Fuites, frottements et eau qui bout sous faible pression limitent une pompe à main à environ 7 mètres, moins en montagne.

Une pompe foulante chasse l'eau par un clapet de refoulement, aussi haut que le permettent l'effort fourni et la solidité des tuyaux. Les pompes de puits profond placent le cylindre sous l'eau et actionnent le piston par une longue tige : l'aspiration ne fixe plus la limite. Deux cylindres alternés, ou un piston à double effet qui refoule dans les deux sens, régularisent le débit, et une cloche à air, où l'air enfermé se comprime puis se détend, change les à-coups en jet continu.

Comment la construire

Une petite pompe aspirante pour un puits peu profond ou une cuve de pluie se fait en tube plastique. L'eau doit se trouver à moins de 6 mètres environ sous le cylindre, idéalement à 3 ou 4.

Le cylindre. Montez droit 60 à 80 cm de tube PVC lisse d'environ 50 mm de diamètre, avec un té près du haut comme bec. Un tuyau plus fin part de sa base et plonge dans l'eau. Tous les raccords sous le piston doivent être étanches à l'air.

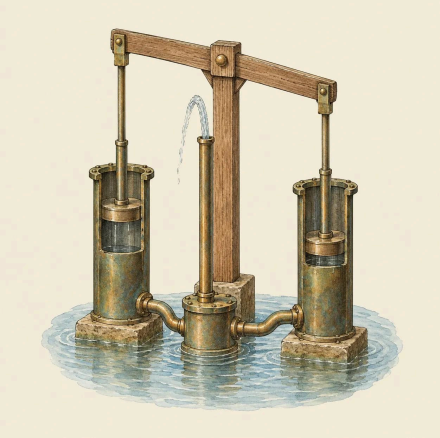
Le clapet de pied. Fermez le bas du cylindre par un bouchon percé d'un trou d'environ 2 cm. Posez dessus un disque de cuir ou de chambre à air, vissé sur un bord qui sert de charnière et lesté d'une rondelle.

Le piston. Taillez un bouchon de bois dur ou de plastique un peu plus petit que l'alésage, percez-le et couvrez les trous d'un clapet semblable. Serrez dessous une coupelle de cuir épais ou de caoutchouc, bord relevé vers le haut et centre évidé pour laisser les trous libres. Faites tremper un cuir avant de le monter. Une tige relie le piston à un levier d'environ un mètre, articulé sur un poteau.

Amorcer et entretenir. Versez un verre d'eau propre dans le cylindre pour mouiller le cuir et rendre les clapets étanches, puis pompez. Si la pompe se vide pendant la nuit, vérifiez d'abord le clapet de pied.

> **Sécurité.** Ne laissez jamais un puits ouvert : fermez-le par une dalle ou un couvercle qui porte un adulte, et tenez les enfants à l'écart. Ne descendez jamais dans un puits, où l'air peut manquer d'oxygène. Gardez les doigts loin de l'articulation. Rendez étanche le passage du tuyau, faites pencher le sol vers l'extérieur et tenez latrines et animaux à distance. N'amorcez qu'avec de l'eau potable, car elle finit dans le puits. Le cuir, la chambre à air et le plastique ordinaire ne sont pas faits pour l'eau de boisson : réservez cette pompe à l'arrosage ou au lavage, ou construisez-la entièrement avec des pièces certifiées pour l'eau potable. Ne buvez pas l'eau d'un puits avant qu'une analyse l'ait déclarée saine ; l'ébullition tue les germes mais n'élimine pas les produits chimiques.

Histoire et évolutions



La pompe de Ctésibios telle que la décrit Vitruve : deux cylindres de bronze qui travaillent tour à tour et alimentent un seul tuyau montant.

On attribue la pompe foulante à Ctésibios, ingénieur à Alexandrie vers 270 av. J.-C. Vitruve en décrit les cylindres de bronze et les clapets vers 25 av. J.-C. Un inventaire dressé en 2007 par Richard Stein compte treize pompes romaines en métal, surtout en bronze, et dix-huit en bois de chêne, trouvées pour la plupart dans des puits ; celle de Silchester est au musée de Reading.

Vers 1206, al-Jazari décrit une pompe mue par une roue hydraulique, à deux pistons opposés et à véritables tuyaux d'aspiration. Les pompes aspirantes gagnent les mines européennes à la fin du Moyen Âge. En 1556, Georgius Agricola décrit des séries de trois pompes étagées, chacune avec environ sept mètres de tuyau, qui remontent l'eau de bac en bac.

En 1638, Galilée rapporte qu'aucune pompe aspirante ne peut élever l'eau à plus de dix-huit brasses florentines, environ 10,5 mètres, et pense que la colonne se rompt sous son propre poids. Son élève Torricelli trouve la cause en 1644 (certains récits disent 1643) : dans un tube de verre, le mercure se tient à environ 76 cm, soutenu par le poids de l'air. En 1648, à la demande de Pascal, son beau-frère monte le tube au sommet du puy de Dôme, où le mercure se tient environ 8,5 cm plus bas.

À Londres, Richard Newsham fait breveter en 1721 une pompe à incendie dont les deux corps alimentent une cloche à air, d'où un jet continu. Pour les mines, Thomas Newcomen avait construit dès 1712, près de Dudley, sa première machine à vapeur, qui actionnait leurs pompes. En Inde, un bilan de l'UNICEF établit en 1974 que les trois quarts des puits forés au cours des sept années précédentes ne donnent pas d'eau. L'UNICEF, le gouvernement et la firme Richardson and Cruddas mettent alors au point l'India Mark II, dont le cylindre descend dans le forage et qui puise jusqu'à 50 mètres. On en compte des millions, exportées dans plus de 40 pays.

Une pompe à incendie du type de Newsham : deux corps de pompe mus par de longs bras, et une cloche à air qui régularise le jet.

Chiffres clés

Limite théorique de l'aspiration

Environ 10,3 m d'eau au niveau de la mer, la hauteur que le poids de l'air peut soutenir

Limite pratique

Environ 7 m entre la surface de l'eau et une pompe à main

Pompe foulante de Ctésibios

Alexandrie, vers 270 av. J.-C. ; connue par Vitruve, vers 25 av. J.-C.

Pompes romaines retrouvées

13 en métal, surtout en bronze, et 18 en bois (inventaire de 2007)

Pompe à main India Mark II

Hauteurs de 10 à 50 m, cylindre de 63,5 mm, des millions installées depuis la fin des années 1970

Sources

1. Vitruvius, On Architecture, Book X, chapter 7 (Gwilt translation, 1826) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
2. Roman Wooden Force Pumps (R. J. B. Stein), in Énergie hydraulique et machines élévatrices d'eau dans l'Antiquité, 2007 · Publications du Centre Jean Bérard, OpenEdition Books https://books.openedition.org/pcjb/405
3. Horror vacui? The syphon experiment · Museo Galileo, Florence https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper1.html
4. Horror vacui? Torricelli's barometric experiment · Museo Galileo, Florence https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper2.html
5. Horror vacui? The void within a void · Museo Galileo, Florence https://imss.fi.it/vuoto/eesper3.html
6. Barometers · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/earth-and-environment/atmosphere-and-weather/meteorological-instruments/barometers
7. Al-Jazari, Badi al-Zaman (Dictionary of Scientific Biography) · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/al-jazari-badi-al-zaman-abu-l-izz-ismail-ibn-al-razzaz
8. Georgius Agricola, De re metallica, Book VI (Hoover translation, 1912) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/38015
9. Mine Pumping in Agricola's Time and Later (R. P. Multhauf, 1959) · Smithsonian Institution, via Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/31024
10. Hand pumps for water lifting · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Energy/Mechanical%20Power/KnO-100411_Human-powered%20handpumps/page5.html
11. No. 6 pump (public-domain handpump specification) · Rural Water Supply Network https://www.rural-water-supply.net/en/implementation/public-domain-handpumps/no-6-pump
12. Water lifting devices, chapter 3.5: reciprocating displacement pumps · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/ah810e/ah810e06.htm
13. India Mark II handpump specification · Rural Water Supply Network https://www.rural-water-supply.net/en/implementation/public-domain-handpumps/india-mark-ii
14. How three handpumps revolutionised rural water supplies: the India Mark II · Rural Water Supply Network https://rwsn.blog/2013/03/19/how-three-handpumps-revolutionised-rural-water-supplies-the-india-mark-ii/
15. A history of UNICEF work on water, sanitation and hygiene in India · UNICEF India https://www.unicef.org/india/stories/history-unicef-work-water-sanitation-and-hygiene-india
16. ASME Landmark: Newcomen Engine · Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/ASME-Landmark:Newcomen_Engine
17. Fire Engine (Newsham, patented 1721) · Colonial Williamsburg Foundation https://history.org/primary-content/fire-engine/
18. Suction pump · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Suction_pump

Faits vérifiés le 2026-10-14

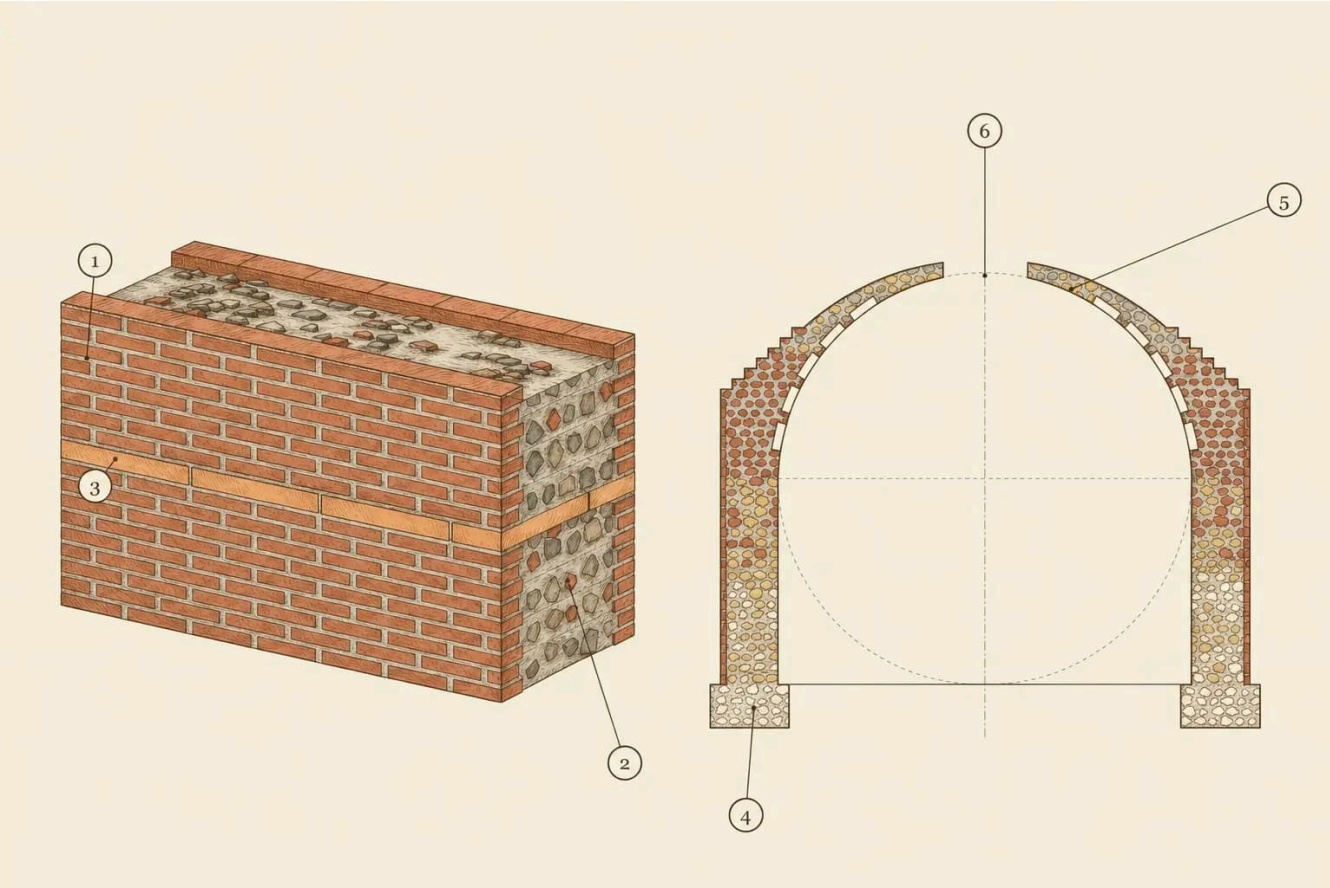
Béton romain

Chaux, cendre volcanique et moellons

v. 200 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite: Briques (p. 40), Maîtrise du feu (p. 9), Chaux et mortier de chaux (p. 31)

Mène à: Ciment Portland (p. 259)



1 Parement de brique 2 Blocage de moellons et de mortier 3 Arase de grandes tuiles plates 4 Travertin lourd des fondations 5 Ponce légère et tuf en haut de la coupole 6 Oculus

Le béton romain est un mortier de chaux tassé autour de moellons ou de fragments de brique; dans sa forme la plus connue, ce mortier contient de la cendre volcanique. La cendre le fait durcir même sous l'eau; il a porté les voûtes de Rome, ses ports et la coupole sans armature du Panthéon, toujours la plus grande de ce type.

Ce que c'est

Le béton romain, l'opus caementicium, est une masse de fragments de pierre liés par un mortier de chaux qui, dans bien des ouvrages romains, contenait de la cendre volcanique. Les Romains appelaient ces fragments caementa, mot dont vient « ciment ». À partir du IIe siècle av. J.-C., il permit d'élever des murs, des voûtes et des coupoles d'une ampleur que la pierre taillée seule n'atteignait pas, pour un coût moindre et avec une main-d'œuvre moins qualifiée.

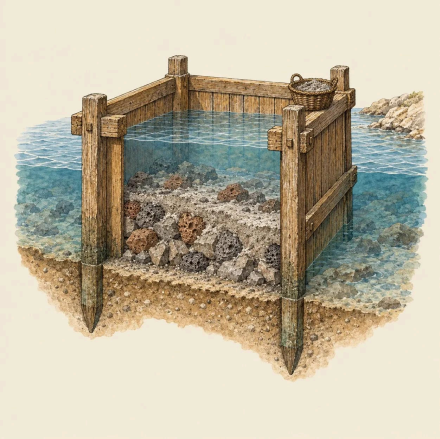
Deux choses le distinguent d'un simple mortier de chaux : la cendre volcanique, qui lui permet de durcir même sous l'eau, et une façon de bâtir par lits de moellons entre des parements de brique ou de petites pierres.

Comment ça marche

Le liant commence par du calcaire. Cuit dans un four, il libère du gaz carbonique et devient de la chaux vive ; au contact de l'eau, celle-ci gonfle, chauffe et devient de la chaux éteinte. Un mortier de chaux aérienne pure durcit lentement, en reprenant le gaz carbonique de l'air, et reste mou là où l'air n'arrive pas.

Un four à chaux : le calcaire est empilé sur un arc au-dessus du feu et ressort en chaux vive blanche.

La cendre volcanique y remédie. Celle de la baie de Naples, appelée pouzzolane d'après la ville de Pouzzoles, est riche en silice et en alumine sous une forme vitreuse et réactive. Elle réagit avec la chaux et l'eau pour former de nouveaux minéraux liants : le mortier durcit par réaction avec l'eau et non avec l'air, même immergé. Vitruve, vers 25 av. J.-C., notait que ce sable volcanique des environs de Baïes et du Vésuve, mêlé à la chaux et aux moellons, durcissait sous l'eau aussi bien qu'à l'air.



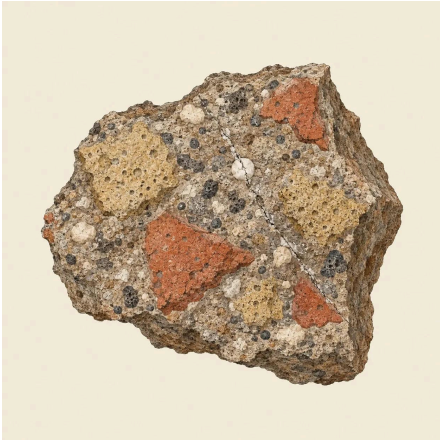
Le béton marin : on remplissait de mortier de cendre et de moellons des caissons de bois plantés dans la mer.

Pour les ports, les bâtisseurs enfonçaient des pieux de bois dans le fond marin, les liaient en une enceinte et la remplissaient de mortier et de blocs de tuf directement dans l'eau ; Vitruve décrit aussi des enceintes vidées de leur eau avant le remplissage. Pline l'Ancien décrivait ces jetées comme une seule masse de pierre, chaque jour plus solide. En 2017, une équipe dirigée par la géologue Marie Jackson a montré que l'eau de mer dissout lentement une partie de la cendre et que de nouveaux minéraux, dont la rare tobermorite alumineuse et la phillipsite, se développent dans ses pores. Selon l'équipe, ces cristaux enchevêtrés aident le béton à résister à la fissuration.

Les ouvriers montaient le béton romain par lits. Ils étalaient un lit de pierres grosses comme le poing ou de briques cassées, y damaient du mortier, et recommençaient lit après lit ; le mortier arrivait au mur dans des paniers portés à la main. Les parements de brique ou de petits moellons équarris servaient de coffrage perdu. Des arases de grandes tuiles plates traversaient le mur à intervalles réguliers et liaient les deux parements au blocage.

En 2023, une équipe du MIT dirigée par Admir Masic a étudié les petits nodules blancs de chaux présents dans le béton romain. Elle en a conclu que les bâtisseurs ajoutaient une partie de la chaux sous forme de chaux vive, qui échauffe le mélange en réagissant. Les nodules servent de réserve : quand l'eau pénètre dans une fissure, elle y dissout de la chaux et dépose du carbonate de calcium qui colmate la fente. L'équipe a ensuite fabriqué des mortiers d'essai modernes additionnés de chaux vive, les a fissurés et y a fait couler de l'eau ; d'après le compte rendu du MIT, les fissures se sont refermées en deux semaines environ, alors qu'un témoin sans chaux vive ne s'est pas réparé.

Le béton romain résiste moins à la compression qu'un béton moderne de ciment Portland et gagne lentement en résistance. Les bâtisseurs en tenaient compte : au Panthéon, des arcs de brique noyés dans les murs portaient les charges pendant que le béton durcissait.



Les grains blancs sont des nodules de chaux. Là où une fissure en traverse un, l'eau peut dissoudre la chaux et refermer la fissure par de la calcite.

Comment le fabriquer

Un petit bloc d'essai d'environ 30 cm de long suffit pour voir comment le matériau se comporte. Considérez-le comme une démonstration, jamais comme un élément porteur. Utilisez des produits vendus pour la chaux et la restauration.

Réunir les matériaux. Il faut de la chaux aérienne éteinte (hydratée) en poudre, une pouzzolane naturelle ou une autre pouzzolane vendue pour les mortiers de chaux, et un granulat : briques cassées ou pierres propres, de la taille d'une noix à celle d'un œuf. Portez gants et lunettes dès le début, travaillez dans un lieu bien aéré et limitez la poussière.

Gâcher le mortier. Suivez les dosages en volume que le fournisseur de la pouzzolane indique pour la chaux hydratée. Mettez un masque filtrant ajusté, comme l'exigent les fiches de données de sécurité, et mélangez les poudres à sec. Ajoutez l'eau peu à peu jusqu'à obtenir un mortier ferme et collant, pas liquide.

Monter les parements. Humidifiez auparavant les briques et le granulat de brique, sans laisser d'eau en surface, pour qu'ils n'aspirent pas l'eau du mortier frais. Posez deux minces et courts parements de brique au mortier de chaux, une hauteur de main à la fois. Ils servent de coffrage et restent en place.

Remplir le blocage. Étalez un lit de mortier entre les parements, enfoncez-y le granulat, puis damez du mortier dans les vides avec une dame en bois jusqu'à ce qu'il n'en reste plus. Travaillez par couches de 6 à 8 cm environ, pour que le mortier enrobe chaque morceau, et terminez par une arase de tuiles plates sur toute l'épaisseur du bloc.

Laisser durcir lentement. Gardez l'ouvrage humide et à l'ombre au moins deux semaines, sous des toiles de jute mouillées, et protégez-le du gel. Chaux et pouzzolane continuent de durcir pendant des mois ; cassez le bloc au bout de quelques mois pour voir jusqu'où il a pris.

> **Sécurité.** La chaux est caustique. Elle brûle la peau et peut rendre aveugle : portez gants, manches longues et lunettes étanches, rincez immédiatement toute projection à grande eau claire, puis consultez pour les yeux. Portez un masque filtrant ajusté pour verser ou mélanger à sec chaux et pouzzolane. N'éteignez pas vous-même de chaux vive et ne tentez pas le « mélange à chaud » romain : la chaux vive et l'eau réagissent violemment, bouillonnent et projettent. Ce mélange maison n'est pas testé : ne l'employez ni pour une marche, ni pour un mur, ni pour rien qui doive porter une charge.

Histoire et évolution

Les mortiers de chaux étaient employés autour de la Méditerranée bien avant Rome ; les bâtisseurs romains en firent un matériau de structure. Le béton était d'usage courant vers 150 av. J.-C., et certains chercheurs placent ses débuts un siècle plus tôt. Le béton qui prend sous l'eau a sans doute été mis au point autour de la baie de Naples, d'où vient la cendre, avant la fin du IIe siècle av. J.-C. ; quels ouvrages portuaires conservés sont les plus anciens reste discuté.

Sous l'Empire, il porta la plupart des grands édifices. Le port d'Hérode à Césarée, construit à partir de 22 av. J.-C. environ, fut bâti avec de la cendre expédiée d'Italie. Le Panthéon, reconstruit sous Hadrien entre 117 et 125 apr. J.-C. environ, a une coupole de 43,3 m de diamètre percée au sommet d'une ouverture ronde d'environ 9 m. Ses murs ont près de 6 m d'épaisseur, et le granulat passe du travertin lourd des fondations au tuf et à la brique, puis à la ponce légère et au tuf dans le haut de la coupole. Elle reste la plus grande coupole de béton non armé au monde.

Après la chute de l'Empire d'Occident, les grandes constructions en béton se raréfièrent et le mortier de chaux revint surtout à son rôle de liant des maçonneries. Le béton moderne, à base de ciment Portland et souvent armé d'acier, prend plus vite et résiste mieux, mais dans l'eau de mer il peut se fissurer, et son acier se corroder, en quelques décennies s'il est mal fait ou mal protégé. Des chercheurs étudient aujourd'hui les carottes des ports romains et les nodules de chaux pour mettre au point des bétons plus durables et moins émetteurs de gaz carbonique.

Chiffres clés

Liant
Chaux, souvent avec de la cendre volcanique (pouzzolane)

Dosage pour les ouvrages sous l'eau
Environ 1 part de chaux pour 2 de cendre (Vitruve)

Coupole du Panthéon
43,3 m de diamètre, sans armature, achevée vers 125 apr. J.-C.

Densité du béton du Panthéon
Environ 2 200 kg/m^3 dans les fondations, 1 350 kg/m^3 près du sommet

Sources

1. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book II (lime and pozzolana) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/2*.html
2. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book V, chapter 12 (harbours) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/5*.html
3. Hot mixing and the durability of ancient Roman concrete (news release, 6 January 2023) · MIT News https://news.mit.edu/2023/roman-concrete-durability-lime-casts-0106
4. How seawater strengthens ancient Roman concrete (news release, 3 July 2017) · University of Utah, via EurekAlert! https://www.eurekalert.org/news-releases/778694
5. The Pantheon: crown jewel of Roman concrete (David Moore, Constructor, 2002) · Associated General Contractors of America (Constructor magazine) https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Ma%c3%a7onnerie/B%c3%a9tonRomain/RomanConcretePantheon-Moore2002.pdf
6. Roman concrete · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_concrete
7. A comparison of the chemical and engineering characteristics of ancient Roman hydraulic concrete with a modern reproduction of Vitruvian hydraulic concrete (Gotti, Oleson et al., Archaeometry 50, 2008) · University of Oxford / Wiley (Archaeometry) https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Ma%C3%A7onnerie/B%C3%A9tonRomain/RomanConcrete-Gotti2008.pdf
8. Building for Eternity: the History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea (J. P. Oleson ed., 2014) · Oxbow Books https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/AUTHORS/Oleson2014-BuildingforEternity.pdf
9. Building a Roman pila: the ROMACONS experiment at Brindisi, September 2004 · J. P. Oleson, University of Victoria https://web.uvic.ca/~jpoleson/Harbour%20Concrete/ROMACONS04Pila.html
10. FEM static and dynamic modeling of Roman vaulted monuments in opus caementicium (R. Perucchio, 2012) · University of Rochester, via SAHC Masters https://msc-sahc.org/wp-content/uploads/2020/07/5-fem-roman-vaults-guimaraes-1oct2012.pdf

Faits vérifiés le 2026-10-12

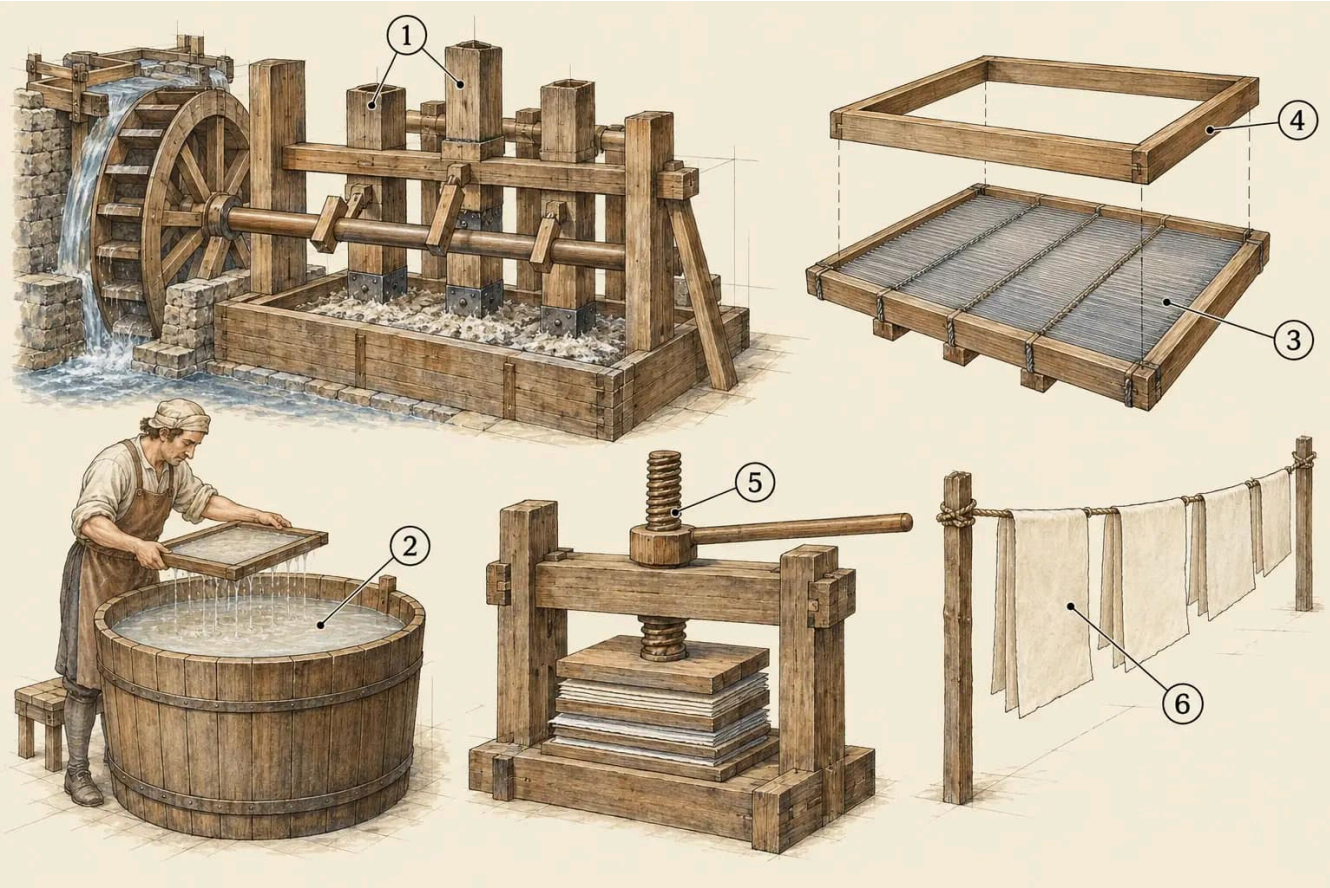
Papier

Un support bon marché pour la mémoire

v. 150 av. J.-C. · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Céramique (p. 23)

Mène à : Montgolfière (p. 233), Presse à imprimer (p. 207)



1 Pilons battant les chiffons 2 Cuve de pâte 3 Forme 4 Couverte 5 Presse à vis et porse de feutres et de feuilles 6 Feuilles mises à sécher

Le papier est un mince feutrage de fibres végétales, battues dans l'eau, recueillies sur un tamis puis séchées jusqu'à ce qu'elles adhèrent les unes aux autres. Plus léger que les lamelles de bambou et moins cher que la soie ou le parchemin, il a porté l'écriture puis l'imprimé de la Chine des Han au reste du monde.

Ce que c’est

Le papier est une feuille de fibres végétales séparées, mises en suspension dans l’eau puis déposées en une couche mince. En séchant, ce feutrage tient sans colle. Le papyrus, lui, est fait de lanières de moelle d’un souchet, la plante papyrus, pressées en croix, et le parchemin est une peau.

Il se fabrique même avec des déchets, comme les vieux chiffons ou les filets de pêche usés. Depuis deux mille ans environ, il porte l’écriture, l’imprimé, la monnaie et les cartes.

La planche montre la méthode européenne à la main, employée jusqu’aux machines du XIXe siècle.

Comment ça marche

La solidité du papier vient de la cellulose, la longue molécule des parois végétales. Battues dans l'eau, les fibres gonflent et se divisent en fibrilles fines. Quand la couche humide sèche, l'eau rapproche les fibres et des liaisons hydrogène se forment partout où elles se touchent. L'eau les défait : c'est pour cela qu'un papier mouillé se déchire si facilement.

Écorce, chanvre, chiffons et vieux filets : les matières citées dans le rapport de Cai Lun en 105.

D'abord, la pâte. En Chine, on faisait tremper, bouillir et piler l'écorce, le chanvre, plus tard le bambou. En Europe, les chiffons de lin et de chanvre pourrissaient quelques semaines avant d'être battus dans des auges par des maillets de bois, soulevés par les cames d'une roue à aubes.

Vergeures fines, chaînettes plus fortes et filigrane cousu en fil de laiton.

La pâte est délayée dans une cuve jusqu'à ressembler à du lait clair. L'ouvreur y plonge la forme, un cadre de bois tendu de fils métalliques fins, et la ressort à plat. Un cadre amovible, la couverte, posé dessus, limite les bords de la feuille. Pendant que l'eau s'égoutte, il secoue brièvement la forme dans les deux sens pour que les fibres se croisent et s'enchevêtrent.

Le coucheur retourne la forme sur un feutre de laine, où la feuille humide reste collée. Feutres et feuilles s'empilent en une porse, que l'on essore sous une presse à vis. Les feuilles sèchent ensuite sur des cordes. Pour écrire à l'encre, on les trempait en Europe dans une colle de gélatine animale ; sans elle, l'encre bave comme sur un buvard.

Comment le fabriquer

Les chiffons de coton ou de lin, le chanvre et l'écorce interne du mûrier sont les fibres les plus faciles. Le bois exige un râpage mécanique ou une cuisson chimique.

Préparer les fibres. Coupez les chiffons en petits morceaux. Faites-les tremper plusieurs jours, puis battez-les au pilon ou au maillet sur une pierre plate, jusqu'à ce qu'une pincée secouée dans un bocal d'eau s'ouvre en un nuage sans fil visible. L'écorce, elle, bout d'abord quelques heures dans de l'eau et de la cendre de bois, dans une marmite en fer ou en inox (jamais en aluminium) ; on la rince ensuite jusqu'à ce que l'eau sorte claire et que la fibre ne glisse plus sous les doigts, puis on la bat.

Faire la forme et la couverte. Assemblez deux cadres identiques en bois de fil droit, aux dimensions de la feuille voulue. Sur l'un, tendez un tamis fin : fil de laiton, toile très serrée, ou fines tiges de bambou ou d'herbe liées côte à côte, comme en Asie. L'autre cadre, laissé nu, sert de couverte.

Former la feuille. Remplissez le bac d'eau et ajoutez de la pâte jusqu'à ce que l'eau se trouble. Tenez forme et couverte ensemble, plongez-les par le côté opposé, ressortez-les à plat et secouez doucement pendant que l'eau s'écoule.

Coucher et presser. Ôtez la couverte, retournez la forme sur un feutre humide et appuyez sur le dos pour que la feuille s'y dépose. Posez un autre feutre dessus et recommencez. Serrez la pile sous des planches lestées ou une presse à vis.

Sécher et coller. Suspendez les feuilles sur une corde ou étalez-les à la brosse sur une planche lisse. Pour écrire à l'encre, trempez-les une fois sèches dans une gélatine tiède ou un empois d'amidon, et laissez sécher.

> **Sécurité.** La lessive de cendre brûle la peau et les yeux : portez des gants et des lunettes, et faites bouillir les fibres en plein air. Le sol autour d'une cuve reste mouillé et glissant. Les maillets mus par l'eau et les presses à vis peuvent écraser les doigts : avant d'y mettre la main, débrayez la roue, bloquez les maillets pour qu'ils ne puissent pas retomber et desserrez la presse.

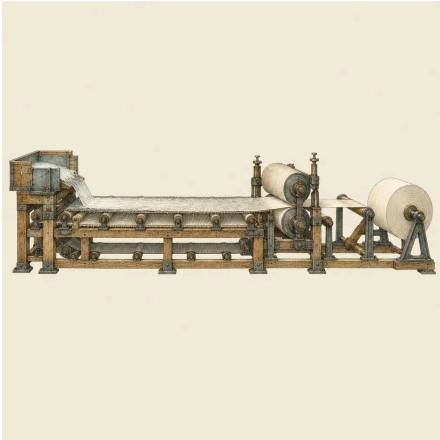
Histoire et évolution

Pendant des siècles, on a attribué l'invention à Cai Lun, fonctionnaire de la cour des Han orientaux, qui présenta en 105 à l'empereur une façon de faire du papier avec de l'écorce, des déchets de chanvre, des chiffons et des filets de pêche. L'archéologie a reculé la date : un fragment portant une carte dessinée, trouvé dans une tombe de Fangmatan, au Gansu, remonte au IIe siècle av. J.-C. Cai Lun a plus probablement perfectionné le procédé et rendu le papier pratique pour l'écriture.

Le papier gagne la Corée, le Viêt Nam puis, au début du VIIe siècle, le Japon. L'histoire des prisonniers chinois de la bataille de Talas (751) qui l'auraient apporté à Samarcande est mise en doute, car on l'y utilisait déjà. Par le monde islamique, le savoir-faire atteint l'Espagne, où Xàtiva fabrique du papier dès le XIIe siècle.

Au XIIIe siècle, les moulins de Fabriano, en Italie, ajoutent les piles à maillets mues par l'eau, le collage à la gélatine et le filigrane. Ulman Stromer installe à Nuremberg, en 1390, le premier moulin à papier attesté en terre allemande.

En 1799, le Français Louis-Nicolas Robert fait breveter une machine qui forme le papier sur une toile métallique sans fin. Les frères Fourdrinier financent sa mise au point en Angleterre, et les machines modernes en gardent le principe. Dans les années 1840, Friedrich Gottlob Keller en Saxe et Charles Fenerty en Nouvelle-Écosse montrent que le bois râpé peut remplacer le chiffon. La pâte de bois fait baisser le prix du papier et aide les journaux à se multiplier, mais elle est souvent acide : bien des livres du XIXe siècle jaunissent et cassent, quand le papier de chiffon du XVe siècle reste souple.



Sur la machine à papier, la forme devient une toile sans fin et la feuille une bande continue.

Chiffres clés

Plus ancien fragment connu
Carte de Fangmatan (Gansu), entre 179 et 141 av. J.-C.

Premier moulin à papier en terre allemande
Nuremberg, 1390

Premier brevet de machine à papier
Louis-Nicolas Robert, 1799

Rapport de Cai Lun à l'empereur
105 apr. J.-C.

Production d'une équipe de cuve à la main
De 1 000 à 4 500 feuilles environ par longue journée de travail

Sources

1. History of paper · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_paper
2. The oldest paper on Earth to be displayed (Fangmatan map) · Hong Kong SAR Government https://www.info.gov.hk/gia/general/199809/05/0904159.htm
3. Cai Lun invents paper · EBSCO Research Starters https://ebsco.com/research-starters/history/cai-lun-invents-paper
4. Topics in Preservation Science: Fabriano paper · Library of Congress https://loc.gov/preservation/outreach/tops/albro/index.html
5. The history of papermaking · Confederation of European Paper Industries (CEPI) https://cepi.org/?p=768
6. Magnolia PaperWeight: an app for hand papermakers and paper conservators · Magnolia Editions (Donald Farnsworth) https://www.magnoliaeditions.com/wp-content/uploads/2021/05/PaperWeight-article-V2.1.pdf
7. Cranberry Corner No. 5 · Guild of Book Workers Newsletter (Edward H. Snider) https://guildofbookworkers.org/sites/default/files/newsletter/gbw115/paper.html
8. European Papermaking Techniques 1300–1800 · University of Iowa (Timothy Barrett) https://paper.lib.uiowa.edu/european.php
9. Chain lines · Mills Archive https://millsarchive.org/glossary/a-z-glossary/2794

Faits vérifiés le 2026-10-11

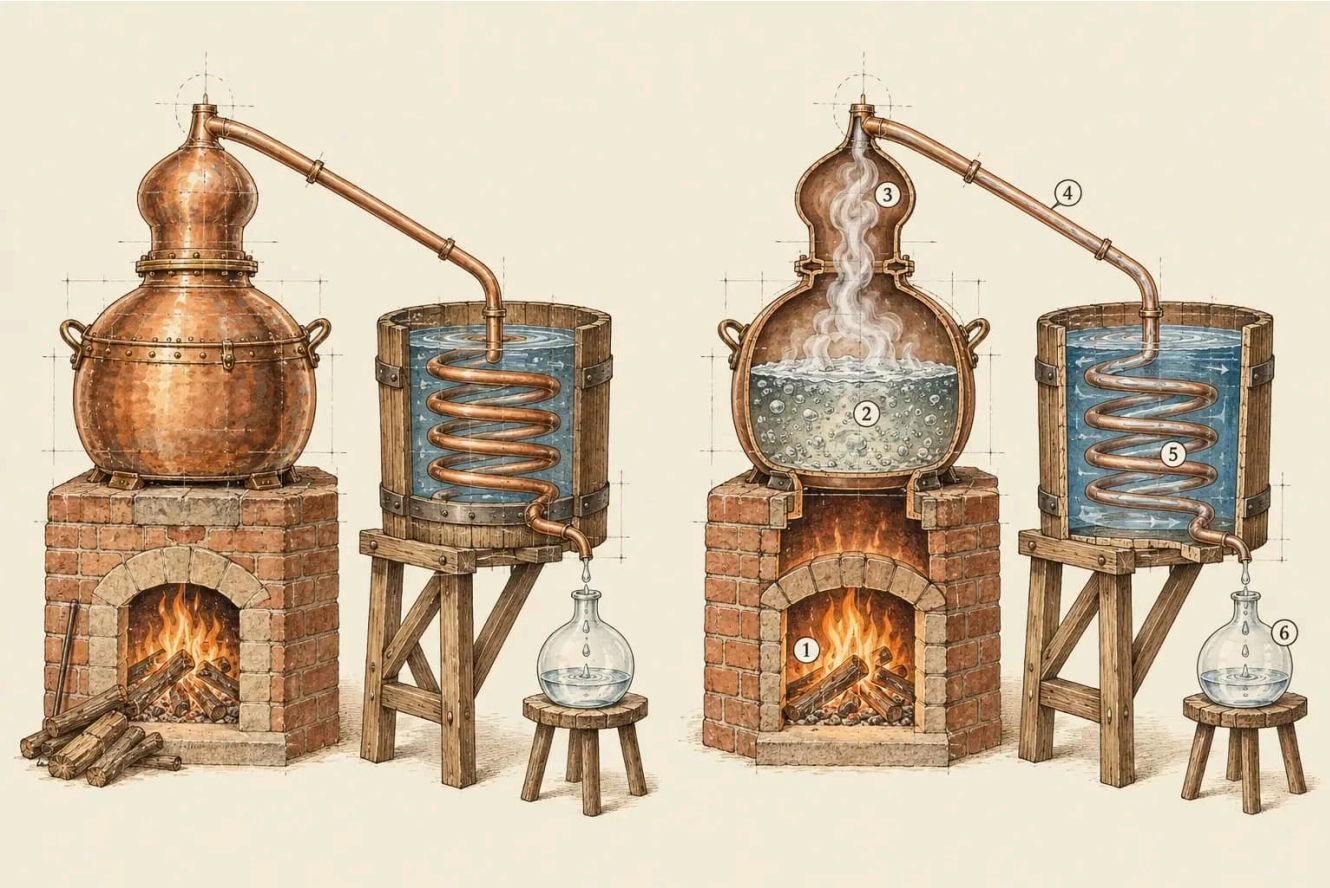
Distillation

Séparer les liquides en les vaporisant

v. 300 · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Céramique (p. 23), Maîtrise du feu (p. 9)

Mène à : Hygiène et antisepsie (p. 301), Moteur à combustion interne (p. 316), Réfrigération (p. 284)



1 Feu du fourneau 2 Cuve de liquide en ébullition 3 Chapiteau 4 Col de cygne 5 Serpentin dans un baquet d'eau froide 6 Vase récepteur

La distillation sépare les constituants d'un liquide en le chauffant jusqu'à en vaporiser une partie, puis en refroidissant cette vapeur pour la recueillir à l'état liquide dans un autre récipient. Décrite en Égypte romaine vers 300 apr. J.-C., elle a fourni l'eau pure, les parfums et les huiles essentielles, l'alcool des médecins et, depuis le XIXe siècle, les carburants tirés du pétrole.

Ce que c'est

Distiller, c'est séparer des substances en les vaporisant puis en les condensant. On chauffe un liquide, le plus souvent jusqu'à ébullition, pour qu'une partie se change en vapeur ; cette vapeur est conduite ailleurs, refroidie, et redevient liquide dans un autre récipient. Ce qui ne s'évapore pas reste dans la cuve : le sel, la boue, les colorants, la plupart des germes.

Les apothicaires s'en servaient pour leurs remèdes et leurs eaux parfumées, les parfumeurs pour tirer l'odeur des fleurs, les médecins pour obtenir l'alcool fort qui dissolvait leurs drogues et lavait les plaies. Laboratoires et

hôpitaux emploient l'eau distillée parce qu'elle ne contient presque plus de sels dissous, et c'est pour la même raison qu'on en remet dans les batteries au plomb.

La planche montre un alambic du début du XVIe siècle, tel qu'on le dessinait dans les premiers livres imprimés sur la distillation : une cuve de cuivre sur un petit fourneau, un chapiteau bombé, et un tuyau qui serpente dans un baquet d'eau froide avant de goutter dans un vase.

Comment ça marche

Tout liquide dégage de la vapeur, d'autant plus qu'il est chaud, et il bout quand la pression de cette vapeur égale celle de l'air. Au niveau de la mer, l'eau bout à 100 °C, l'éthanol, l'alcool du vin, vers 78 °C, et le méthanol vers 65 °C. Les sels ne s'évaporent presque pas : en faisant bouillir de l'eau de mer et en condensant la vapeur, on obtient de l'eau douce.

Le feu chauffe la cuve, et la vapeur monte dans le chapiteau. Elle descend ensuite par le col de cygne jusqu'au serpentin, un tuyau enroulé plongé dans l'eau froide, qui lui retire sa chaleur. La vapeur se condense contre le cuivre et s'écoule goutte à goutte dans le vase récepteur.

Dans le vase florentin, l'huile flotte sur l'eau, qui s'évacue par le tube latéral.

Les huiles essentielles s'obtiennent par entraînement à la vapeur. La vapeur traverse des fleurs, des feuilles ou des zestes et emporte leur huile odorante. L'huile et l'eau ne se mélangent pas : chacune apporte sa propre pression de vapeur, et le couple bout en dessous de 100 °C, même quand l'huile seule ne bouillirait qu'au-delà de 250 °C. L'huile passe donc sans brûler et forme une couche à part dans le récepteur.

Quand deux liquides miscibles s'évaporent tous deux, comme l'eau et l'alcool, la séparation reste partielle. La vapeur est plus riche en liquide volatil, sans être pure, et les distillateurs repassaient le produit à l'alambic. Une colonne de fractionnement répète l'opération à chaque étage, en un seul passage : la vapeur qui monte croise le liquide qui redescend, c'est le reflux, et une partie se condense puis se revaporise à chaque niveau. Les raffineries séparent ainsi le pétrole brut en gaz, essence, kérosène, gazole et résidus lourds selon leurs plages d'ébullition.

Comment s'y prendre

Cette partie ne traite que d'une chose : rendre potable une eau salée ou boueuse. Elle ne décrit pas la fabrication d'alcool. Distiller des eaux-de-vie chez soi est interdit sans autorisation dans de nombreux pays, et un alambic mal conduit peut concentrer du méthanol, qui rend aveugle et tue à petite dose et ne se reconnaît ni au goût ni à l'odeur.

Distillateur solaire. Versez quelques centimètres d'eau dans un bac peu profond et sombre, en plein soleil. Couvrez-le d'une vitre propre, ou d'un plastique transparent de qualité alimentaire qui supporte la chaleur, incliné pour que les gouttes glissent sur sa face inférieure jusqu'à une gouttière, le long du bord bas, qui mène à un bocal en verre couvert. Rendez les bords étanches pour que la vapeur ne s'échappe pas. Sous le soleil des tropiques, un appareil bien construit donne deux à trois litres par mètre carré et par jour ; ailleurs, et avec du matériel de fortune, comptez moins.

Marmite et couvercle. Remplissez à moitié une grande marmite en métal et posez-la sur le feu. Au centre, placez un petit bol propre en métal sur une pierre, le bord bien au-dessus de l'eau. Posez un couvercle en métal à l'envers,

Couvercle retourné, l'eau qui se condense dessous coule vers la poignée et goutte dans le bol.

poignée tournée vers le bol, et refroidissez-le avec de la neige, de l'eau froide ou un linge mouillé ; ne refroidissez jamais ainsi un couvercle en verre, qui peut éclater. Gardez une ébullition douce : de gros bouillons projetteraient de l'eau brute dans le bol.

Guettez les fuites. Faites sécher quelques gouttes de l'eau recueillie sur une assiette sombre et propre. Une croûte blanche signale que de l'eau brute éclabousse ou fuit vers le récipient. Une assiette nette ne prouve rien de plus : ni que l'appareil sépare bien, ni que l'eau est saine, car une eau limpide peut contenir des produits nocifs et seule une analyse en laboratoire permet de le savoir.

Connaissez les limites. La distillation laisse derrière elle le sel, les métaux comme le plomb, les nitrates et les germes. Elle n'élimine pas sûrement les substances qui bouillent près de 100 °C ou en dessous, comme certains solvants et carburants, et d'autres produits passent avec la vapeur : si la source peut être polluée par des produits chimiques, cherchez-en une autre. Conservez l'eau dans des récipients propres et couverts, en verre, en inox ou en plastique alimentaire, car les germes reviennent vite. Évitez les poteries vernissées, dont l'émail peut libérer du plomb.

> **Sécurité.** La vapeur brûle plus gravement que l'eau bouillante : soulevez les couvercles loin du visage. Ne fermez jamais hermétiquement un récipient que l'on chauffe et n'attachez jamais son couvercle ; la vapeur doit toujours pouvoir sortir, sinon la marmite peut éclater. Le verre ordinaire se fend sur une flamme ou sous un froid brutal. Surveillez le feu, tenez-le loin des herbes sèches et gardez les enfants à distance. Ne distillez jamais de carburant, d'alcool ni de liquide inconnu : leurs vapeurs s'enflamment, et le méthanol d'un liquide fermenté passe dans le distillat.

Histoire et évolution

À Tepe Gawra, dans le nord de l'Irak, des poteries des Ve et IVe millénaires av. J.-C. portent autour du col une rigole qui a pu recueillir un liquide condensé. Des répliques testées lors d'expériences publiées en 2020 ont donné une eau parfumée, mais l'usage d'origine de ces vases reste discuté.

Les premières descriptions claires d'alambics viennent d'Égypte romaine. Vers 300 apr. J.-C., l'alchimiste Zosime de Panopolis décrit des alambics à un ou plusieurs tuyaux et en attribue certains à Marie la Juive. Alchimistes et médecins du monde islamique reprennent l'appareil, et son nom arabe, al-anbiq, devient « alambic ». Au IXe siècle, le philosophe al-Kindi consacre aux parfums et à la distillation un livre de plus de cent recettes.

Le tribikos des alchimistes d'Alexandrie conduisait la vapeur par trois becs vers trois flacons.

À Bologne, dans les années 1270, des médecins décrivent l'aqua vitae, l'« eau de vie », un alcool distillé du vin et employé comme remède. À Strasbourg, le chirurgien Hieronymus Brunschwig publie en 1500 le premier manuel imprimé sur la distillation des eaux médicinales, puis un ouvrage plus ample en 1512.

En 1830, l'Irlandais Aeneas Coffey fait breveter un alambic à deux colonnes qui travaille en continu et non plus par charges. Vers 1854, Samuel Kier tient à Pittsburgh l'une des premières raffineries de pétrole et distille le brut pour en tirer du pétrole lampant. En 2011, la distillation représentait encore environ un tiers de la capacité

de dessalement installée dans le monde, souvent dans des usines qui récupèrent la chaleur perdue de centrales électriques.

Chiffres clés

Températures d'ébullition au niveau de la mer
Eau 100 °C, éthanol environ 78 °C, méthanol environ 65 °C

Première description claire d'un alambic
Zosime de Panopolis, Égypte, vers 300 apr. J.-C.

Distillateur solaire simple
Environ 2,3 à 3 litres par mètre carré et par jour sous soleil tropical

Alambic à colonnes continu
Breveté par Aeneas Coffey en 1830

Dessalement en 2011
Environ un tiers de la capacité mondiale par distillation, 60 % par osmose inverse

Sources

1. Ancient Distillation and Experimental Archaeology about the Prehistoric Apparatuses of Tepe Gawra (Belgiorno, 2020) · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10508
2. Zosimos of Panopolis · Complete Dictionary of Scientific Biography, via Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/zosimos-panopolis
3. Classic kit: Mary's bath (Sella, 2009) · Chemistry World, Royal Society of Chemistry https://www.chemistryworld.com/opinion/classic-kit-marys-bath/3004925.article
4. Distillation · Foundation for Science, Technology and Civilisation (Muslim Heritage) https://muslimheritage.com/distillation/
5. Al-Kindī's Attack on Alchemy and His Perfume Making (Inoue, 2017) · Orient 52, Society for Near Eastern Studies in Japan https://www.jstage.jst.go.jp/article/orient/52/0/52_72/_article
6. Aqua vitae (Wondrich) · The Oxford Companion to Spirits and Cocktails, Oxford University Press https://www.spiritsanddistilling.com/dictionary/acref-9780199311132-e-1030
7. Coffey, Aeneas · The Oxford Companion to Spirits and Cocktails, Oxford University Press https://www.spiritsanddistilling.com/dictionary/id/acref-9780199311132-e-1328
8. Distilling reliable remedies: Hieronymus Brunschwig's Liber de arte distillandi (1500) (Taape) · Ambix 61, Apollo repository, University of Cambridge https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/260374
9. Liber de arte Distillandi de Compositis (Brunschwig, 1512) · Science History Institute https://digital.sciencehistory.org/works/1jcqz5i
10. Steam Distillation: Separation Theory (Nichols) · LibreTexts Chemistry https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Oneonta/Chem_221%3A_Organic_Chemistry_I_(Bennett)/2%3ALab_Textbook_(Nichols)/05%3A_Distillation/5.05%3A_Steam_Distillation/5.5C%3A_Separation_Theory
11. Drinking Water Treatment: Distillation (G1493) · University of Nebraska–Lincoln Extension https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1493/html/view
12. Solar distillation · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Energy/Solar%20energy/solar-distillation/page5.html
13. Some Petroleum Pioneers of Pittsburgh (Mann, 2009) · Heinz History Center https://www.heinzhistorycenter.org/wp-content/uploads/2022/08/4-Petroleum-Pioneers.pdf
14. Modern technology and economical developments in desalination on emphasis of nuclear methodology (Abdallah) · Acta Technica Corviniensis, 2018 https://acta.fih.upt.ro/pdf/2018-2/ACTA-2018-2-08.pdf
15. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data (Sharqawy, Lienhard and Zubair, 2010) · Desalination and Water Treatment 16, via DSpace@MIT https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/69157

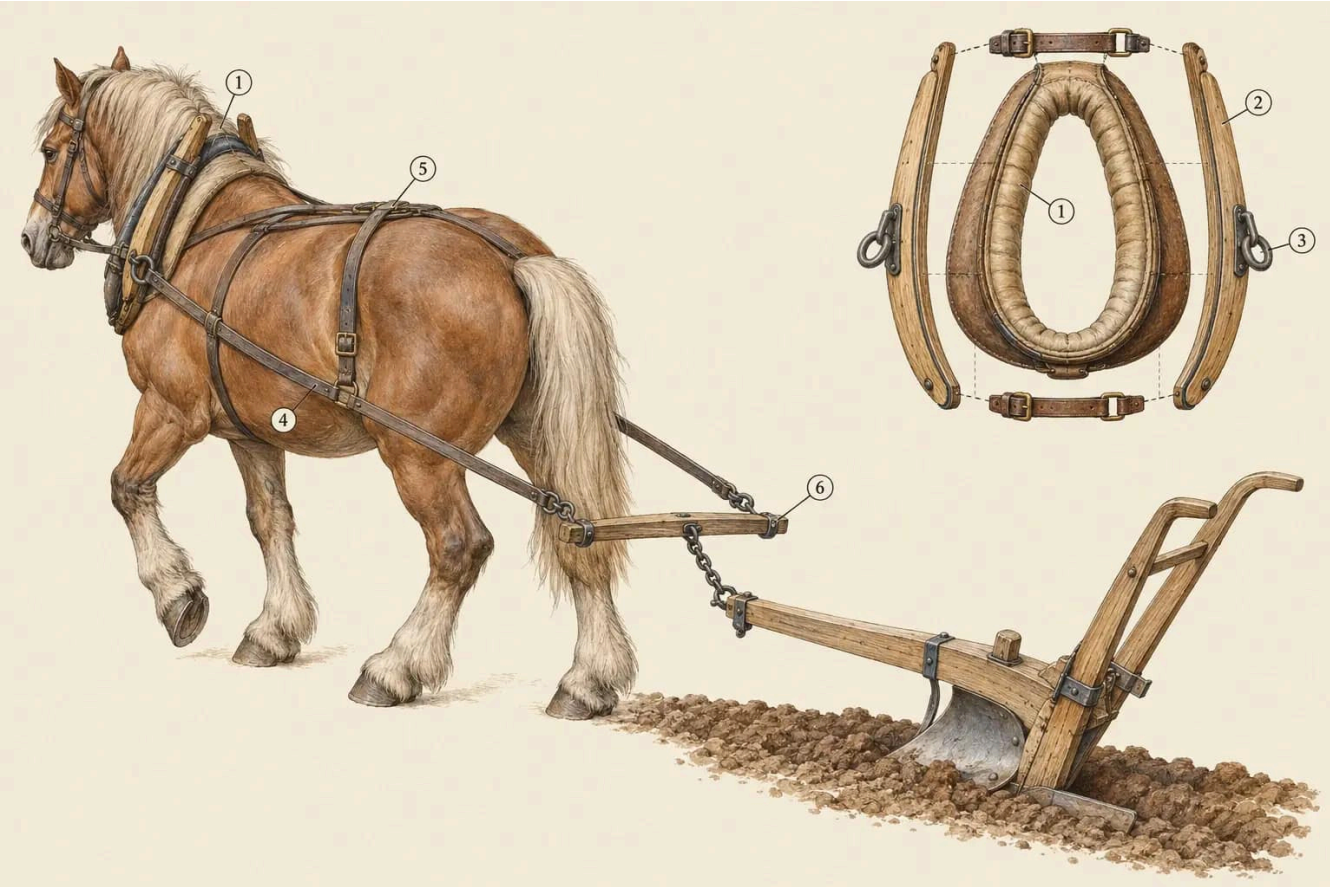
Faits vérifiés le 2026-10-14

Collier d'attelage

Le cheval tire avec ses épaules

v. 480 · Antiquité · Artisanat & cités

Nécessite : Tannage du cuir (p. 103), Corde & cordage (p. 13)



1 Collier rembourré 2 Attelles 3 Crochet d'attelle 4 Trait 5 Dossière 6 Palonnier

Le collier d'attelage est un anneau rigide et rembourré qui s'appuie sur les épaules du cheval ; les traits y sont accrochés près de la pointe de l'épaule. Le cheval peut alors peser de tout son poids sur la charge sans comprimer sa trachée, et dans l'Europe médiévale il a repris aux bœufs une grande partie des labours et des charrois.

Ce que c'est

Le collier d'attelage est un anneau de cuir bourré de paille, façonné pour se poser à la base de l'encolure, contre l'avant des épaules. Deux pièces de bois ou de métal cintrées, les attelles, sont sanglées dans une gorge qui fait le tour du collier, et les traits qui tirent la charge s'y accrochent. Une dossière passée sur le dos maintient les traits à bonne hauteur, et une barre de bois transversale, le palonnier, relie leurs extrémités à la charrue ou à la voiture.

Avec ce harnais, le cheval pousse avec le poitrail et les épaules, comme un homme qui se penche sur une charrette à bras. Avec le fer à clous et la charrue lourde, le collier a permis au cheval de remplacer le bœuf dans beaucoup de fermes du nord de l'Europe médiévale.

Comment ça marche

On a d'abord mis le cheval au joug, comme le bœuf. Le timon du char aboutissait à un joug posé sur l'encolure ou le garrot de la paire, la crête au-dessus des épaules, retenu par une courroie autour de chaque cou. Les chevaux de char égyptiens portaient des fourches de joug qui appuyaient sur les épaules, et les attelages grecs et romains tiraient surtout contre une courroie de poitrail. Richard Lefebvre des Noëttes a reconstitué tout cela sous la forme d'une courroie qui remontait et comprimait la trachée. Les expériences menées depuis le contredisent (voir l'histoire).

L'attelage « à la gorge et à la sangle » tel que les historiens l'ont longtemps dessiné : un joug sur le garrot, une courroie de cou et une sangle.

Le bœuf se prête mieux au joug. Son encolure est courte et épaisse, et beaucoup de races ont une bosse ou un bourrelet de muscle devant le garrot, sur lequel la pièce de bois prend appui. Le joug de tête est lié aux cornes ; le joug de garrot repose sur l'encolure, devant les épaules. Le cheval, lui, a une longue encolure et la trachée juste sous la peau.

Bœufs sous un joug d'encolure : la pièce de bois appuie sur le cou devant les épaules, des arceaux la ferment par-dessous.

La bricole est venue en premier : une large courroie passe devant le poitrail, sous la trachée, et les traits partent de ses extrémités. Légère, elle sert encore pour les voitures légères, mais sous une charge lourde et saccadée elle glisse et blesse.

Le collier répartit la même poussée sur une surface plus grande et plus rigide. Sa face repose sur les muscles placés devant les omoplates et laisse un vide à la gorge. Les attelles forment un cadre rigide : chaque trait tire sur l'ensemble du collier. Pour des bovins de trait, W. Micuta, de la fondation Bellerive, estimait l'appui d'un collier bien rembourré à environ 1 200 cm² sur les deux épaules, contre environ 200 cm² pour un joug d'encolure.

La ligne de traction compte autant que le rembourrage. Les crochets des attelles se placent un peu au-dessus de la pointe de l'épaule, et chaque trait doit en partir à angle droit avec la pente de l'épaule. Si les traits remontent vers un point d'attache trop haut, ils soulèvent le collier contre la gorge. Le palonnier pivote en son milieu : le cheval peut balancer les épaules en marchant sans donner d'à-coups à la charge.

Comment le construire

Les colliers sont cousus par des bourreliers, avec un boudin de paille serrée à l'avant et une face lisse côté cheval. Un bon collier d'occasion, ajusté avec soin, vaut en général mieux qu'un collier fait maison.

Choisir la taille. On mesure le collier à l'intérieur, de haut en bas : 16 pouces (41 cm) ou moins pour un poney, 24 pouces (61 cm) ou plus pour un gros cheval de trait. Un cheval à l'encolure épaisse demande aussi un collier plus large en haut.

Vérifier l'ajustement. Plaquez le collier contre les épaules, comme sous l'effort. Sur les côtés, les doigts à plat doivent passer entre le bord et l'encolure, mais pas la main entière. Laissez environ 5 cm à la gorge. Un collier trop court remonte et étrangle ; trop long, il descend sur la pointe de l'épaule et blesse.

Poser les attelles. Elles doivent reposer à plat dans la gorge sur toute leur longueur. Bouclez d'abord la courroie du bas, puis tendez celle du haut bien droite.

Régler les traits. La dossière porte les traits à bonne hauteur, et la sous-ventrière les empêche de remonter sous l'effort. Réglez les deux pour que chaque trait quitte son crochet à angle droit avec l'épaule, et attelez assez bas pour que les traits ne tirent jamais le collier vers le haut.

Surveiller les blessures. Un poil usé ras sur l'épaule est le premier signal : corrigez l'ajustement avant que la peau ne s'ouvre, et laissez au repos un cheval blessé jusqu'à guérison. Un cheval qui maigrit demandera une garniture ou un collier plus petit. À chaque pause, soulevez le collier pour laisser respirer les épaules ; le soir, nettoyez la face du collier et les épaules.

On vérifie le jeu à la gorge, le collier plaqué contre les épaules.

> **Sécurité.** Un cheval de trait peut peser près d'une tonne ; il peut ruer, s'emballer ou vous coincer contre la voiture. Apprenez auprès d'un meneur expérimenté, et faites tenir le cheval par un aide pendant que vous attelez ou dételez. Suivez à chaque fois, de la même façon, l'ordre d'attelage et de dételage qu'on vous a appris. N'enjambez jamais un trait, ne vous placez jamais entre le cheval et la charge, et ne vous attachez jamais à la charge par une corde ou une guide. Parlez au cheval avant de toucher son arrière-main. Accordez des pauses et de l'eau, et arrêtez si le cheval montre de la détresse ou si le harnais glisse.

Histoire et évolutions

La Chine a abandonné le joug la première. Une boîte laquée de l'État de Chu, peinte au IVe siècle av. J.-C., montre des chevaux tirant contre une barre posée en travers du poitrail, et la bricole, plus souple, est fréquente sur les reliefs de l'époque Han. La plus ancienne image nette d'un attelage à collier est une peinture murale de la grotte 257 de Mogao, à Dunhuang, datée de 477–499 apr. J.-C., même si le rembourrage y est mal visible. Pita Kelekna place la bricole comme le collier au Ier millénaire av. J.-C.

Le collier gagne l'Europe au haut Moyen Âge, sans doute par l'Asie centrale. Lynn White le situe dans le monde carolingien vers 800 ; W. Micuta indique le XIe siècle. Au XIIe, il est courant. Avec le fer pour les terrains humides et l'avoine de l'assolement triennal, le cheval prend en charge les labours dans une partie du Nord, plus vite que le bœuf.

Pendant des décennies, on a cru que l'attelage antique étranglait le cheval. Lefebvre des Noëttes essaie une reconstitution en 1910 et conclut que deux chevaux ne tirent guère plus de 500 kg. Dans des expériences publiées en 1977, Jean Spruytte reconstruit des harnais égyptiens, grecs et romains, montre que la reconstitution précédente était fausse et tire environ une tonne sur du sable avec l'un d'eux. Ces travaux laissent au collier son intérêt pour les tractions lentes et lourdes comme le labour, et ils écartent l'idée de chevaux antiques étouffés par leur harnais.

Chiffres clés

Plus ancienne image nette

Grotte 257 de Mogao, Dunhuang (Chine), 477–499 apr. J.-C.

En Europe

Vers 800 dans le monde carolingien ; répandu aux XIe–XIIe siècles

Tailles de collier

Environ 16 à 24 pouces (41 à 61 cm), mesurés à l'intérieur, de haut en bas

Jeu à la gorge

Environ 5 cm, collier plaqué contre les épaules

Surface d'appui (bovins de trait)

Environ 1 200 cm^2 pour un collier rembourré sur les deux épaules, contre 200 cm^2 environ pour un joug de cou (estimation de W. Micuta)

Sources

1. Technology in the Middle Ages (Lynn White Jr., in Technology in Western Civilization, 1967) · Oxford University Press (course reading, Manchester University) https://users.manchester.edu/facstaff/ssnaragon/kant/lp/Readings/White,%20Plow.html
2. L'attelage dans l'Antiquité. Le prestige d'une erreur scientifique (Marie-Claire Amouretti, 1991) · Annales. Économies, Sociétés, Civilisations 46-1 https://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1991_num_46_1_278939
3. Roman Traction Systems: the dorsal yoke (Judith A. Weller) · Roman Science and Technology, humanist.de https://humanist.de/rome/rts/dorsal.html
4. The Lefebvre des Noëttes review page · Roman Science and Technology, humanist.de https://humanist.de/rome/ldn/index.html
5. The Swiss collar for developing countries (W. Micuta) · FAO https://www.fao.org/4/V0600T/v0600T0j.htm
6. Collars, Hames and Harness Fitting (Horse & Mule Association of America, Leaflet 276, 1944) · Small Farmer's Journal https://smallfarmersjournal.com/collars-hames-and-harness-fitting/
7. Hitching Safely (Jenifer Morrissey, with Doc Hammill) · Rural Heritage https://ruralheritage.com/hitching-safely/
8. Horse Collar Harnessing: Ancient Carriage Tech · Science and Technology Daily https://www.stdaily.com/web/English/2025-10/24/content_420664.html
9. Efficient equine transport (Pita Kelekna) · Cambridge University Press blog https://cambridgeblog.org/2009/05/efficient-equine-transport/
10. Horse collar · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Horse_collar

Faits vérifiés le 2026-10-14

Poudre noire

L'explosif des armes à feu et des mines

v. 850 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite: Maîtrise du feu (p. 9), Charbon de bois (p. 65)

1 Moulin à poudre 2 Roue hydraulique 3 Talus boisé entre les bâtiments 4 Baril à poudre cerclé de cuivre 5 Poire à poudre en corne 6 Cristaux de salpêtre

La poudre noire est un mélange de salpêtre, de charbon de bois et de soufre qui brûle extrêmement vite en dégageant des gaz chauds et une fumée de particules solides. Des alchimistes chinois la découvrirent au IXe siècle; en cinq siècles, elle devint la charge propulsive des fusées, des armes à feu et des canons, puis un outil des mines et des grands travaux.

Ce que c'est

La poudre noire est le plus ancien explosif chimique connu. C'est une poudre noire ou gris foncé faite de trois substances: le salpêtre (nitrate de potassium), le charbon de bois et le soufre. La plupart des combustibles ont besoin de l'air pour brûler; la poudre, elle, transporte son propre oxygène et brûle donc en espace clos. En une fraction de seconde, une grande partie de sa masse se change en gaz chauds, dont la pression peut chasser une balle d'un canon ou fendre la roche.

Jusqu'au XIXe siècle, ce fut le seul explosif d'usage courant et la charge propulsive de toutes les armes à feu. On l'appelle aujourd'hui poudre noire pour la distinguer des poudres sans fumée qui l'ont remplacée dans les armes à

feu à partir des années 1880. Elle sert encore dans les feux d'artifice, les mèches lentes, les armes à chargement par la bouche et certaines carrières.

La planche montre une poudrerie du XVIIIe siècle vue de l'extérieur. Les moulins se dressaient très espacés le long d'une rivière qui faisait tourner leurs roues, séparés par des talus et des arbres, pour qu'une explosion dans l'un risque moins de gagner le suivant. Sur la Brandywine, dans le Delaware, beaucoup avaient trois murs de pierre épais, un toit léger et une façade légère côté rivière : le souffle d'une explosion partait ainsi au-dessus de l'eau. À côté de la scène figurent un baril cerclé de cuivre, métal choisi parce qu'il risque bien moins que le fer de faire des étincelles, une poire en corne dans laquelle soldats et chasseurs portaient leur poudre, et des cristaux de salpêtre.

Comment ça marche

Brûler, c'est faire réagir un combustible avec de l'oxygène. Dans un feu de bois, l'oxygène vient de l'air, et la vitesse du feu dépend de l'air qui parvient jusqu'au bois. Dans la poudre, l'oxygène est contenu dans le salpêtre, intimement mêlé au combustible. Quand la poudre chauffe, le salpêtre se décompose et libère son oxygène au contact même des particules de combustible : la réaction n'attend pas l'air.

Chaque ingrédient a son rôle. Le salpêtre est l'oxydant et représente la plus grande partie de la masse. Le charbon de bois est le combustible principal ; poreux, il offre beaucoup de surface à l'oxygène pour peu de matière. Le soufre est aussi un combustible, mais il compte surtout parce qu'il abaisse la température à laquelle le mélange s'enflamme et accélère la combustion. La pureté du salpêtre et l'essence de bois dont venait le charbon changeaient le comportement d'une poudre, et les poudriers soignaient l'un et l'autre.

Les produits sont en partie des gaz, surtout du dioxyde de carbone, de l'azote et du monoxyde de carbone, et en partie des sels de potassium solides. Un peu moins de la moitié de la masse devient gaz. Le reste part en épaisse fumée blanche ou se dépose en un résidu qui encrasse le canon d'une arme, qu'il fallait nettoyer souvent.

La poudre noire déflagre : elle brûle très vite, mais la réaction passe de grain en grain par la chaleur. À l'air libre, de la poudre en vrac brûle dans un éclair et un nuage de fumée. Enfermée dans un canon, le gaz ne peut s'échapper, la pression monte, la poudre brûle plus vite encore et les gaz chassent le projectile. Les explosifs brisants comme le TNT ou la dynamite détonent au contraire : une onde de choc les traverse à plusieurs kilomètres par seconde, plus vite que le son dans la matière, et la réaction est achevée presque aussitôt, avec un choc qui pulvérise. La poudre noire donne une poussée plus longue et plus douce. C'est ce qui convient à une charge propulsive, qui doit accélérer une balle sans faire éclater le canon, et c'est pourquoi les carriers l'ont longtemps employée pour détacher des blocs de pierre que la dynamite aurait brisés.

Une étincelle, une flamme, un frottement, un choc ou l'électricité statique peuvent l'enflammer, et de nombreux ouvriers sont morts dans des explosions de poudreries. Sa fabrication, son stockage et son transport relèvent presque partout de la réglementation des explosifs.

Histoire et évolution

Les alchimistes chinois de la dynastie Tang chauffaient du salpêtre, du soufre et bien d'autres substances en quête d'élixirs de longue vie. Un texte taoïste, daté en général du milieu du IXe siècle, met les alchimistes en garde contre certains mélanges contenant du salpêtre : quelques-uns, pour les avoir chauffés, se sont brûlé les mains et le visage, et ont même perdu leur maison dans l'incendie. Les historiens discutent pour savoir si un texte antérieur, de 808, décrit déjà un mélange semblable. Le mélange prit le nom de *huoyao*, « remède de feu ».

Les armées chinoises l'employèrent bientôt à la guerre. Le *Wujing Zongyao*, compendium militaire achevé en 1044, décrit des armes incendiaires et fumigènes et contient les plus anciennes formules écrites conservées. Une

bannière de soie de Dunhuang, peinte au milieu du Xe siècle, représente une lance à feu, et les troupes Song employèrent des lances à feu au siège de De'an en 1132. Au XIIIe siècle, les défenseurs Jin et Song lançaient du haut de leurs murailles des bombes à poudre sur les armées mongoles qui les assiégeaient, et le tube de la lance à feu devint métallique et reçut des projectiles. Le canon à main en bronze trouvé dans la province du Heilongjiang ne porte aucune date, mais son lieu de découverte le rattache à des combats attestés en 1288, ce qui en fait l'une des plus anciennes armes à feu conservées.

La lance à feu, un tube de poudre fixé à une lance, crachait des flammes pendant quelques secondes à courte distance.

Les premières armes à feu chinoises étaient de courts tubes de bronze fixés à un manche en bois.

La connaissance de la poudre gagna l'ouest à travers l'empire mongol et le monde islamique au XIIIe siècle. Dans le sultanat mamelouk, le traité du Syrien Hasan al-Rammah, écrit à la fin du XIIIe siècle, décrit des engins incendiaires et des fusées, et le frère franciscain anglais Roger Bacon mentionne la poudre en 1267. Les premières mentions et images d'armes à feu en Europe datent des années 1320 : en 1326, la ville de Florence commanda des canons de métal et leurs munitions, et le traité que Walter de Milemete écrivit en 1326-1327 pour le jeune Édouard III contient le dessin d'un canon. Vingt ans plus tard, les Anglais employèrent probablement quelques petits canons à la bataille de Crécy. Au XVe siècle, l'artillerie de siège pouvait abattre en quelques semaines les hautes murailles médiévales, et les ingénieurs militaires répondirent par des murs bas et épais et des bastions en angle.

Le salpêtre était l'ingrédient difficile à trouver. En Europe, les salpêtriers avaient le droit de creuser le sol des écuries, des colombiers et des caves, et les États créèrent plus tard des nitrières où il se formait dans des tas de terre et de fumier. Au XVIIe siècle, les compagnies de commerce européennes en achetaient de grandes quantités en Inde, au Gujarat, au Bihar et au Bengale. En 1775, le chimiste Antoine Lavoisier devint l'un des quatre régisseurs de la nouvelle Régie royale des poudres et salpêtres et, depuis son laboratoire de l'Arsenal à Paris, travailla à améliorer l'approvisionnement et la qualité de la poudre française. Au XIXe siècle, les gisements de nitrate de sodium du désert chilien alimentèrent l'industrie des explosifs et des engrais, jusqu'à ce que des chimistes allemands apprennent, au début du XXe siècle, à fabriquer des composés azotés à partir de l'air.

Le salpêtre se forme lentement là où des déchets organiques pourrissent dans un sol humide ; pendant des siècles, on l'a gratté sur des murs et des sols comme celui-ci.

Les poudreries comptaient parmi les lieux de travail les plus dangereux de l'ère industrielle. Les moulins des du Pont sur la Brandywine, dans le Delaware, ouverts en 1802, connurent 288 explosions et au moins 228 morts avant leur fermeture en 1921. À l'entrée, on fouillait les ouvriers à la recherche d'allumettes et de métal sur leurs vêtements et leurs chaussures. La poudre a creusé canaux, tunnels et mines : l'une des plus anciennes mentions de son emploi dans une mine vient de Banská Štiavnica, dans le royaume de Hongrie, en 1627. À partir des années 1870, la dynamite la remplaça pour la plupart des travaux de minage, et les poudres sans fumée à base de nitrocellulose remplacèrent la poudre noire dans les armes à feu dans les années 1880 et 1890. Elle survit dans les feux d'artifice, les mèches et chez les tireurs d'armes anciennes.

Chiffres clés

Mise en garde écrite ancienne

Milieu du IXe siècle, texte alchimique taoïste, Chine

Plus anciennes formules écrites conservées

1044, compendium militaire Wujing Zongyao

Une des plus anciennes armes à feu conservées

Canon à main en bronze du Heilongjiang, daté par son contexte de 1288 environ

Première image européenne d'un canon

1326-1327, manuscrit de Walter de Milemete, Angleterre

Poudreries du Pont, Delaware (1802-1921)

288 explosions, au moins 228 morts

Sources

1. China in 1000 CE, Song dynasty module: gunpowder · Asia for Educators, Columbia University https://afe.easia.columbia.edu/songdynasty-module/tech-gunpowder.html
2. Christ Church MS 92: Walter of Milemete, De nobilitatibus, sapientiis et prudentiis regum (1326–1327) · Christ Church, Oxford (manuscript catalogue) https://www.chch.ox.ac.uk/sites/default/files/2023-09/MS-92.pdf
3. Eleutherian Mills (Hagley), National Register of Historic Places nomination form · U.S. National Park Service https://npgallery.nps.gov/NRHP/GetAsset/NHLS/66000259_text
4. Powder Yard Trail · Hagley Museum and Library https://www.hagley.org/pyt
5. Antoine-Laurent Lavoisier · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/antoine-laurent-lavoisier/
6. History of gunpowder · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_gunpowder
7. Heilongjiang hand cannon · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Heilongjiang_hand_cannon

Faits vérifiés le 2026-10-12

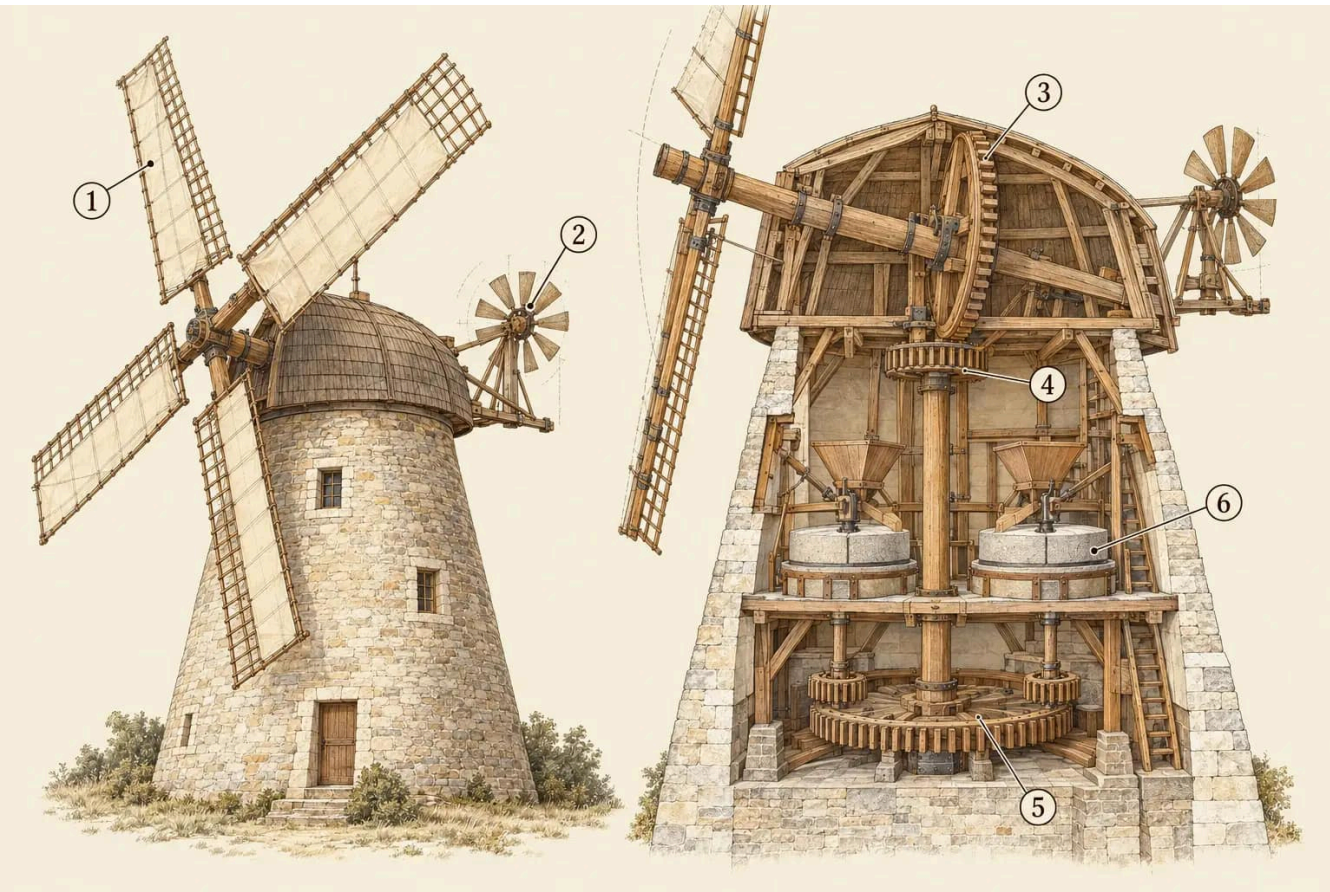
Moulin à vent

Le vent changé en farine

v. 900 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite : Engrenages (p. 155), Roue hydraulique (p. 159), Corde & cordage (p. 13)

Mène à : Éolienne (p. 342)



1 Ailes 2 Éolienne d'orientation 3 Rouet (roue dentée de l'arbre des ailes) 4 Lanterne 5 Hérisson (grande roue d'entraînement) 6 Meules

Un moulin à vent capte l'énergie du vent avec de grandes ailes et la transmet, par une série d'engrenages en bois et en fer, à une meule qui écrase le grain. Du XIIe siècle à l'arrivée de la vapeur, il a été avec la roue hydraulique la principale source d'énergie mécanique en Europe.

Ce que c’est

Un moulin à vent est une machine qui transforme le mouvement de l’air en rotation, puis cette rotation en travail utile. Pendant la majeure partie de son histoire, ce travail a consisté à moudre le grain. On l’a aussi employé pour pomper l’eau des polders, scier du bois, presser des graines oléagineuses ou broyer des pigments.

La version représentée ici est un moulin-tour : une tour de pierre fixe, coiffée d’un toit qui pivote pour présenter les ailes au vent. Cette forme s’est répandue en Europe à partir de la fin du Moyen Âge, car la maçonnerie porte de grandes ailes et une machinerie lourde, le tout à l’abri des intempéries.

Comment ça marche

Le vent pousse sur les ailes, légèrement vrillées et inclinées. Elles se comportent comme les pales d'une hélice : une partie de la poussée devient un couple qui fait tourner l'arbre des ailes, un gros arbre presque horizontal logé dans le toit.

Le moulin sur pivot tourne tout entier sur son poteau ; dans le moulin-tour, seul le toit pivote.

Sur cet arbre est calé le rouet, une grande roue dont les dents sont plantées sur la face. Il engrène avec la lanterne, plus petite, montée sur l'arbre vertical : le mouvement passe de l'horizontale à la verticale et gagne en vitesse. Plus bas, le hérisson entraîne un petit pignon sur l'axe de chaque paire de meules. Au moulin de Gedney Dyke, dans le Lincolnshire, un rouet de 96 dents menait une lanterne de 68, et un hérisson de 120 dents des pignons de 18 : les meules tournaient ainsi environ neuf fois plus vite que les ailes.

La meule tournante repose sur l'anille, au sommet du fer de meule qui traverse la meule dormante.

L'axe en fer, appelé fer de meule, monte à travers la meule fixe, la dormante. À son sommet se trouve l'anille, une barre ou une croix de fer qui s'emboîte dans l'œil de la meule supérieure, la tournante, et en porte tout le poids. Dans certains moulins, le hérisson est placé au-dessus des meules et l'entraînement descend par un court arbre de fer, mais la tournante repose toujours sur le fer de meule. Le grain tombe de la trémie dans l'œil. Les rayons taillés dans les deux pierres le coupent et poussent la mouture vers le bord, d'où elle sort en farine. Le meunier lève ou abaisse le fer de meule avec la trempure, et cet écartement décide de la finesse de la farine.

La puissance du vent croît avec le cube de sa vitesse : un vent deux fois plus fort apporte huit fois plus d'énergie. Aucun rotor ne peut en récupérer plus de 59,3 %, une limite publiée par Albert Betz en 1920. Les moulins traditionnels restent loin de ce chiffre.

Comment le construire

Un moulin à vent demande une communauté organisée : charpentiers, maçons, un forgeron et un meunier qui sait rhabiller les meules. Les étapes ci-dessous donnent l'ordre du travail et les choix qui comptent ; les cotes restent l'affaire du charpentier de moulin.

Choisir le site. Une butte dégagée, loin des arbres et des bâtiments, exposée aux vents dominants. Sous le vent d'un arbre ou d'une maison, l'air reste turbulent sur environ vingt fois sa hauteur : gardez les obstacles à bonne distance du côté d'où vient le vent.

Monter la tour. Une tour tronconique en pierre ou en brique, aux murs épais à la base. Le sommet porte une couronne de bois ou de fer, bien de niveau, sur laquelle le toit tourne grâce à des galets.

Tailler l'arbre et les roues. L'arbre des ailes est taillé dans un tronc de chêne, puis fretté de fer aux points d'usure ; à partir de la fin du XVIIIe siècle, on le coule souvent en fonte. Les roues sont en bois dur, et les dents sont des pièces séparées, souvent en charme ou en pommier, qu'on remplace quand elles s'usent.

Fabriquer les ailes. Quatre bras portent chacun un treillis de lattes sur lequel on tend une toile. Moulin arrêté et ailes enchaînées, le meunier tend plus ou moins de toile sur chaque aile selon la force du vent, comme on prend des ris sur un voilier.

Choisir les meules. La pierre doit être dure et poreuse. La pierre meulière de La Ferté-sous-Jouarre était recherchée dans toute l'Europe. On assemblait la meule à partir de plusieurs morceaux scellés au plâtre et cerclés de fer.

Prévoir le frein. Un frein en bois serre la jante du rouet. Il doit retenir les ailes par grand vent : on l'essaie d'abord par brise légère, puis un charpentier de moulin vérifie qu'avec les chaînes des ailes il tiendra par gros temps, avant toute mise en service.

> **Sécurité.** Ne jamais passer dans la course des ailes, même lentes, et ne jamais toucher une aile avant d'avoir serré le frein et enchaîné les ailes. Surveiller le temps : rentrer les toiles et immobiliser le moulin avant l'arrivée d'une tempête, car en plein coup de vent personne ne peut travailler sur les ailes. À l'intérieur, tenir les mains, les cheveux et les vêtements amples loin des engrenages et des arbres en rotation. Un frein qui chauffe peut mettre le feu au toit, et beaucoup de moulins ont brûlé ainsi. La poussière de farine en suspension est inflammable : aucune flamme nue à l'intérieur.

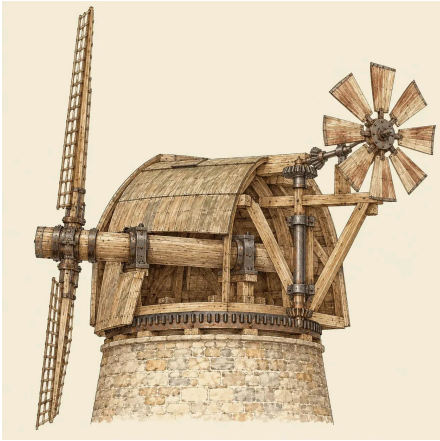
Histoire et évolutions

Les premiers moulins à vent bien documentés se trouvaient dans le Sistan, aux confins de l'Iran et de l'Afghanistan actuels. Des géographes arabes les décrivent au Xe siècle, et ils sont peut-être plus anciens. Leurs ailes tournent autour d'un axe vertical, à l'intérieur de murs qui canalisent le vent.

En Europe, le moulin à axe horizontal apparaît à la fin du XIIe siècle. L'une des plus anciennes mentions datées concerne un moulin sur pivot à Weedley, dans le Yorkshire, inscrit en 1185 dans un inventaire des biens des Templiers. Le moulin-tour, dont seul le toit pivote, se répand ensuite et permet de construire plus grand.

En 1745, le forgeron anglais Edmund Lee fait breveter l'éolienne d'orientation, une petite roue à pales placée à l'arrière du toit. Dès que le vent tourne, elle se met en mouvement et fait pivoter le toit jusqu'à ramener les ailes face au vent. En 1772, le constructeur de moulins écossais Andrew Meikle invente les ailes à ressorts, faites de volets qui s'ouvrent seuls sous les rafales.

Les Pays-Bas comptaient entre neuf et dix mille moulins à vent au milieu du XIXe siècle, pour moudre et surtout pour assécher les terres. La machine à vapeur puis le moteur électrique les ont remplacés ; il en reste environ un millier aujourd'hui. Les éoliennes modernes appliquent la même physique du rotor pour entraîner des générateurs.



L'éolienne d'orientation entraîne le toit sur sa couronne dentée jusqu'à ce que les ailes fassent face au vent.

Chiffres clés

Vitesse des ailes
Environ 10 à 15 tours/min par vent de travail

Vitesse de la meule
Environ 100 à 150 tours/min

Puissance
Proportionnelle au cube de la vitesse du vent

Limite théorique
59,3 % de l'énergie du vent (limite de Betz)

Sources

1. Windmill · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Windmill
2. Betz's law · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
3. Fantail (windmill) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Fantail_(windmill)
4. Technical descriptions of English windmills · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org/2019/09/13/technical-descriptions-of-english-windmills/31
5. Weedley windmill site (R. Gregory) · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org/library/index/?which=8434
6. First Windmill Use · Environment & Society Portal, Rachel Carson Center https://www.environmentandsociety.org/taxonomy/term/5347

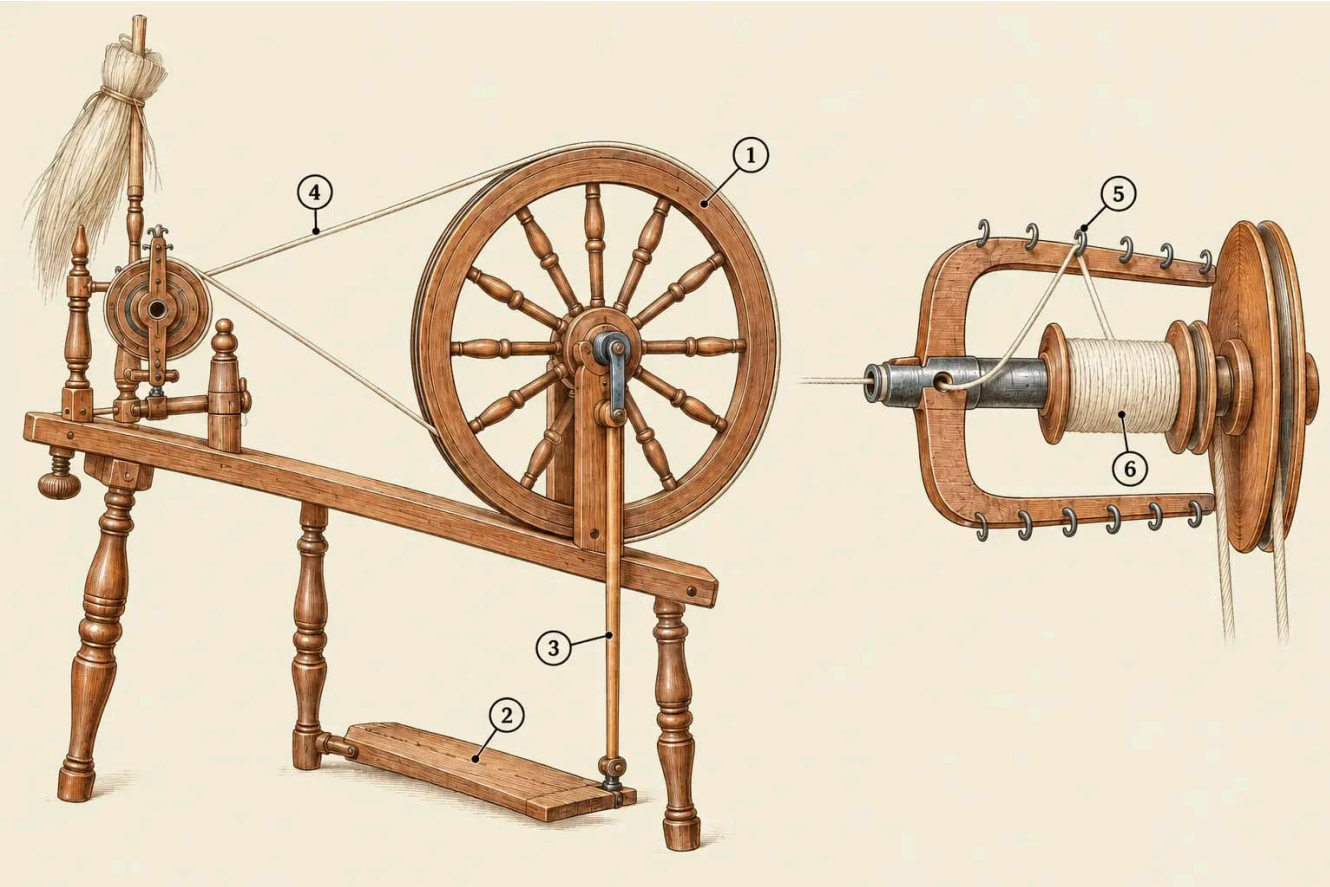
Faits vérifiés le 2026-10-11

Rouet

La fibre changée en fil, plus vite

v. 1000 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite : Roue & essieu (p. 83), Corde & cordage (p. 13)



1 Roue motrice 2 Pédale 3 Bielle (tige de pédale) 4 Corde d'entraînement 5 Ailette à crochets 6 Bobine

Le rouet tord la fibre en fil grâce à une broche entraînée par une grande roue, bien plus vite qu'un fuseau à main. Le rouet à ailette, connu en Allemagne vers 1480, enroule en plus le fil sur une bobine pendant qu'il le file, si bien que filage et renvidage n'alternent plus.

Ce que c’est

Filer, c’est transformer une masse de fibres courtes, comme la laine, le lin ou le coton, en un fil continu. Deux choses se font en même temps : on étire les fibres en une mèche fine et régulière, et on tord cette mèche pour que les fibres s’accrochent entre elles. C’est la torsion qui donne au fil sa solidité.

Pendant des millénaires, on l’a fait au fuseau, une baguette lestée d’une fusaïole qu’on fait tourner entre les doigts. Le rouet pose la broche sur un bâti et l’entraîne par une corde avec une grande roue. Un tour de la grande roue fait faire de nombreux tours à la petite broche, qui tord donc bien plus vite qu’une main.

La planche montre un rouet saxon, rouet à pédale et à ailette du type répandu dans toute l’Europe à partir du XVIe siècle, ici sous une forme du XVIIIe siècle.

Comment ça marche

Avant le rouet : un fuseau et une quenouille. La fusaïole entretient la rotation du fuseau.

Sur un grand rouet, l'un des types anciens, la broche pointe simplement vers la fileuse. Celle-ci fait tourner la roue, tient la fibre en biais par rapport à la pointe de la broche et recule en étirant une longueur de fil pendant que la torsion y monte. Puis elle s'arrête, tient le fil perpendiculaire à la broche et fait de nouveau tourner la roue pour enrouler la longueur filée. Filage et renvidage alternent.

L'ailette supprime cette pause. Le fil entre dans une broche creuse par un trou à son extrémité avant, l'orifice, ressort par un trou latéral, longe un bras d'une ailette en U, passe sur l'un de ses crochets et s'enroule sur une bobine montée folle sur la broche. Ailette et bobine ont chacune leur poulie à gorge, de tailles différentes. Une seule corde sans fin fait deux fois le tour de la grande roue et une fois le tour de chaque poulie, de sorte que la poulie de la bobine, plus petite, tourne un peu plus vite que l'ailette.

La rotation de l'ailette tord le fil. La petite différence de vitesse entre bobine et ailette l'enroule au fur et à mesure qu'il est filé. De temps en temps, la fileuse arrête la roue et fait passer le fil d'un crochet à l'autre pour que la bobine se remplisse régulièrement, et règle une vis de tension qui déplace l'ensemble de l'ailette le long du banc pour tendre ou détendre la corde.

Les cardes à main : la laine est cardée entre deux cardes puis roulée en boudins prêts à filer.

La pédale libère les deux mains. Une manivelle sur l'axe de la roue est reliée par une tige de bois, la bielle, à une planche articulée sous le pied de la fileuse. Chaque pression du pied relance la roue. Une main fournit la fibre, prise sur une quenouille ou sur un boudin de laine cardée, l'autre règle la torsion. Les rouets saxons servaient surtout pour les fibres longues comme le lin et la laine. Le lin est garni sur une quenouille, d'où l'on tire quelques fibres à la fois. La laine est d'abord cardée entre deux cardes à main et roulée en un boudin souple, pour que les fibres restent lâches et s'étirent régulièrement.

Comment le fabriquer

Un rouet à ailette demande des pièces tournées et un ajustage soigné : c'est un travail pour un menuisier expérimenté équipé d'un tour. Un rouet plus simple, du type le plus ancien, montre le principe et file la laine.

Faire le banc. Une planche solide d'environ 1 m sur trois ou quatre pieds, assez haute pour travailler assis ou debout. À un bout, fixez un montant qui portera la roue ; à l'autre, un montant plus court pour la tête de broche.

Monter la roue. N'importe quelle grande roue bien ronde à jante à gorge convient : une roue de bois à moyeu, rayons et jante, ou une vieille roue de vélo sans son pneu. Montez-la sur un axe dans le montant et ajoutez une poignée près de la jante pour la tourner.

Faire la tête de broche. Deux petits montants sur le poteau court tiennent une tige d'acier droite, pointue à un bout, dans des boucles de cuir ou de petits roulements. Fixez une petite poulie à gorge sur la tige, entre les

montants. La tige est posée en travers du banc, parallèle à l'axe de la roue, sa poulie exactement dans l'alignement de la gorge de la roue pour que la corde coure droit ; sa pointe est tournée vers le côté où vous vous tenez.

Poser la corde. Nouez une boucle de solide cordelette de coton autour de la jante et de la poulie de broche, assez tendue pour entraîner la broche sans patiner. Avec une roue d'un diamètre environ dix fois supérieur à celui de la poulie, la broche fait une dizaine de tours par tour de roue.

Filer. Attachez une amorce de fil à la tige de la broche, enroulez quelques tours, puis faites-la monter en spirale jusqu'à la pointe pour qu'elle en parte. Faites chevaucher son bout et la laine cardée, tournez lentement la roue et reculez en biais par rapport à la pointe, en laissant la torsion monter dans la fibre. Pour renvider, tournez un peu la roue en arrière pour défaire la spirale, tenez le fil perpendiculaire à la broche et tournez en avant ; puis ramenez le fil en spirale jusqu'à la pointe pour la longueur suivante. Quand la broche est pleine, dévidez le fil sur le dévidoir, nouez l'écheveau sans serrer en plusieurs points, retirez-le et lavez-le pour fixer la torsion.

Le dévidoir à main : le fil filé y est enroulé en écheveau de longueur connue avant lavage et teinture.

> **Sécurité.** Gardez doigts, cheveux et manches amples loin de la roue qui tourne, de la corde et de la broche, arrêtez la roue avant de démêler un nœud, et couvrez la pointe acérée de la broche quand le rouet ne sert pas. Vérifiez qu'une roue de vélo ou de bois est solidement fixée et ne voile pas avant de la faire tourner vite. Tenez les jeunes enfants à l'écart d'une roue en mouvement.

Histoire et évolution

L'origine du rouet est discutée. Certains historiens la situent en Inde entre 500 et 1000 apr. J.-C. environ, d'autres en Chine, où il était largement employé vers 1090, ou dans le monde islamique, où il est attesté vers 1030 et clairement représenté à Bagdad dans les années 1230. Il atteint l'Europe au XIIIe siècle ; les images européennes datent d'environ 1280, et les règlements de métiers de Spire, en Allemagne, le mentionnent à la fin du XIIIe siècle (en 1280 ou en 1298 selon les sources). En Europe, rouet et fuseau sont longtemps restés en usage côte à côte.

L'ailette apparaît dans une illustration allemande vers 1480, et Léonard de Vinci en a aussi dessiné une. La pédale fut ajoutée au XVIe siècle ; une tradition l'attribue à un artisan de Brunswick en 1533. Comparé au fuseau, le rouet augmentait fortement la production d'une fileuse. L'historien Lynn White a relié à lui l'abondance accrue des chiffons de lin, et donc d'un papier bon marché pour l'imprimerie.

Dans les années 1760, James Hargreaves construisit la spinning jenny, qui entraînait de nombreuses broches à la fois, puis le water frame de Richard Arkwright et la mule de Samuel Crompton, en 1779, firent passer le filage dans les usines. Au XXe siècle, Gandhi fit du charkha, un rouet simple tourné à la main, l'emblème de l'autonomie indienne, et des fileuses et fileurs travaillent toujours au rouet à pédale.

Chiffres clés

Premiers rouets
Discuté : Inde, Chine ou monde islamique, au plus tard au XIe siècle

Mention ancienne en Europe
Règlements de métiers de Spire (Allemagne), fin du XIIIe siècle

Première ailette
Illustration allemande vers 1480

Pédale
Ajoutée au XVIe siècle

Sources

1. Spinning Wheel, British (Saxony wheel with flyer) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44835
2. Spinning (Bette Hochberg, Encyclopedia of Clothing and Fashion) · Encyclopedia.com (Gale) https://www.encyclopedia.com/fashion/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/spinning
3. Saxon wheel; spinning wheel · Horniman Museum and Gardens https://www.horniman.ac.uk/object/11.40
4. Spinning wheel · Aotea Utanganui, Museum of South Taranaki https://museumofsouthtaranaki.wordpress.com/2016/03/11/spinning-wheel/
5. Spinning wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Spinning_wheel
6. Choosing the whorl to make the yarn you want (Rudy Amann) · Spin Off https://spinoffmagazine.com/choosing-the-whorl-to-make-the-yarn-you-want/
7. Sliding hook flyer, double drive: assembly instructions · Ashford Wheels & Looms https://ashford.co.nz/instructions/SHFDD.pdf
8. DRS spinning wheels revisited · A Fisherman Knits http://gansey.blogspot.com/2018/07/drs-spinning-wheels-revisited.html

Faits vérifiés le 2026-10-12

Boussole

Une aiguille qui montre le nord

v. 1088 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite: Métallurgie du fer (p. 138), Acier (p. 142)

Mène à: Navigation astronomique (p. 212)

1 Anneaux de cardan 2 Cuvette 3 Rose des vents 4 Aiguille aimantée 5 Pivot 6 Pierre d'aimant

Une boussole est une aiguille aimantée, libre de tourner, qui s'aligne sur le champ magnétique terrestre et indique ainsi le nord par tous les temps. Décrite en Chine au XIe siècle et utilisée en mer en Europe vers 1190, elle a permis de tenir un cap loin des côtes et sous un ciel couvert.

Ce que c'est

Une boussole est un petit aimant libre de tourner. Laissé à lui-même, il se place le long des lignes du champ magnétique terrestre, une extrémité vers le nord magnétique, l'autre vers le sud. Le navigateur qui connaît le nord en déduit toutes les autres directions, de nuit, dans le brouillard ou hors de vue des côtes.

La planche montre un compas de marine du XVIe siècle. L'aiguille est collée sous une carte de papier peinte d'une rose des vents, qui tourne donc avec elle. La rose repose sur un pivot au fond d'une cuvette de bois, et la cuvette est suspendue à la cardan pour rester horizontale quand le navire roule.

Comment ça marche

La Terre se comporte à peu près comme un énorme barreau aimanté. Son champ est faible, un demi-gauss environ en surface, mais une aiguille légère sur un bon pivot n'a besoin que d'une très petite force pour tourner. Elle pivote jusqu'à ce que son propre champ s'aligne sur la composante horizontale du champ terrestre, puis s'immobilise.

Frottée sur une pierre d'aimant, l'aiguille d'acier devient elle-même un aimant.

Encore faut-il aimanter l'aiguille. Dans le fer et l'acier, de minuscules régions, les domaines, se comportent chacune comme un aimant, mais elles sont orientées en tous sens et s'annulent. Frotter l'aiguille toujours dans le même sens avec une pierre d'aimant, un morceau de magnétite naturellement aimanté, en aligne une bonne partie, et l'aiguille garde cet ordre. L'acier dur le conserve le mieux. Le fer doux le perd vite : jusqu'au milieu du XVIIIe siècle, les marins devaient réaimanter leurs aiguilles avec une pierre gardée à bord.

Une méthode ancienne : une aiguille sur un flotteur, libre de tourner sur l'eau calme.

Le nord magnétique n'est pas le pôle géographique, et l'angle entre les deux, la déclinaison, varie d'un lieu à l'autre et lentement au fil des années. Le champ est aussi incliné : dans l'hémisphère nord, il tire vers le bas la pointe nord de l'aiguille, dans l'hémisphère sud la pointe sud, et d'autant plus qu'on approche des pôles magnétiques ; les fabricants équilibrent donc l'aiguille avec un petit contrepoids. À bord, le fer des ferrures et de la cargaison dévie encore l'aiguille ; c'est la déviation.

Sur la planche, le pivot pointu et la petite chape de l'aiguille réduisent le frottement. La rose permet au timonier de lire le cap face à un repère fixe de la cuvette. Le verre arrête le vent, et la suspension à la cardan empêche la rose de basculer au roulis.

Comment la fabriquer

Faire l'aiguille. Prenez une aiguille à coudre en acier ou une fine lame d'acier dur d'environ 5 cm. Un fer trop doux ne garde pas l'aimantation.

L'aimanter. Frottez l'aiguille du milieu vers une extrémité avec un pôle d'une pierre d'aimant ou d'un aimant, en écartant la pierre d'un large arc à la fin de chaque passage. Recommencez vingt ou trente fois, toujours dans le même sens.

L'essayer sur l'eau. Enfilez l'aiguille dans un petit bout de liège ou de roseau sec et faites-la flotter dans un bol d'eau calme, loin de tout fer. Repérez l'extrémité qui montre le nord et marquez-la. Au nord des tropiques, vérifiez avec l'étoile polaire la nuit ou avec l'ombre la plus courte au midi solaire, qui pointe alors vers le nord ; au sud des tropiques, cette ombre pointe vers le sud.

Lui donner un pivot. Emboutissez un petit cône dans une chute de laiton mince pour faire une chape et fixez-la au centre de l'aiguille. Plantez une pointe d'aiguille verticale au fond d'une cuvette de bois et posez-y la chape. Équilibrez avec un peu de cire jusqu'à ce que l'aiguille soit horizontale.

Ajouter la rose et le couvercle. Collez l'aiguille sous une carte légère portant les points cardinaux, le nord de la carte au-dessus de la pointe nord de l'aiguille. Peignez à l'intérieur de la cuvette un repère fixe, la ligne de foi,

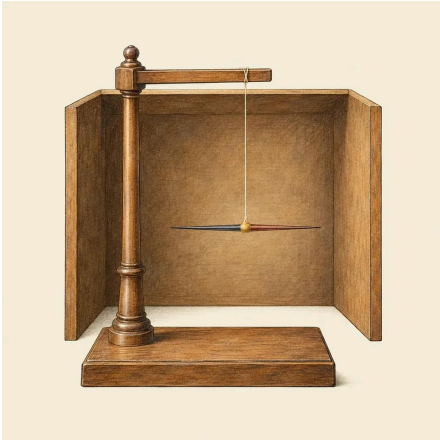
aligné sur l'avant du bateau : on lit le cap sur la rose en face de lui. Une vitre posée sur la cuvette la protège des courants d'air.

La suspendre. Pour un modèle de compas de marine, montez la cuvette dans deux anneaux pivotant à angle droit l'un par rapport à l'autre. Une boussole faite maison reste une démonstration : ne naviguez pas avec avant de l'avoir comparée à un compas éprouvé.

Histoire et évolution

En Chine comme en Grèce, on savait il y a plus de deux mille ans que la pierre d'aimant attire le fer. Des textes de l'époque Han évoquent un objet montrant le sud, utilisé en divination, peut-être une cuillère de magnétite ; les historiens ne s'accordent pas sur sa nature.

Le manuel militaire *Wujing Zongyao*, compilé vers 1044, décrit un mince poisson de fer chauffé au rouge, refroidi dans l'axe nord-sud puis posé sur l'eau, où il indiquait le sud. Vers 1088, Shen Kuo décrit des aiguilles aimantées par frottement sur une pierre d'aimant, posées sur un flotteur ou suspendues à un fil de soie. Il note aussi que l'aiguille pointe un peu à l'est du sud exact, une des premières mentions de la déclinaison. Entre 1111 et 1117, Zhu Yu écrit que les pilotes consultent l'aiguille quand les nuages cachent le soleil et les étoiles.



Pour Shen Kuo, la meilleure monture était une aiguille suspendue à un seul fil de soie.

En Europe, le savant anglais Alexander Neckam décrit vers 1190 des marins utilisant une aiguille aimantée. Un texte persan de 1232 en donne la première mention dans le monde islamique. En 1269, Pierre de Maricourt (Petrus Peregrinus) décrit une boussole sèche sur pivot, et vers 1300 le compas sec à rose se répand en Méditerranée.

Les compas à liquide, qui amortissent les oscillations de la rose, s'imposent au XIXe et au début du XXe siècle, et le gyrocompas, qui trouve le nord vrai sans magnétisme, arrive dans la première décennie du XXe siècle.

Chiffres clés

Poisson de fer flottant sur l'eau
Wujing Zongyao, vers 1044

Boussole à aiguille et déclinaison décrites
Shen Kuo, vers 1088

Premier usage attesté en mer
Chine, entre 1111 et 1117

Première mention européenne
Alexander Neckam, vers 1190

Intensité du champ terrestre
Environ 0,5 gauss (50 microteslas)

Sources

1. History of the compass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_compass
2. Compass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Compass
3. Shen Kuo: first Renaissance man · AAAS https://www.aaas.org/shen-kuo-first-renaissance-man
4. Lodestone, c. 1700–1720 (NAV0710) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-42922
5. Dry card compass, 1838 (ACO0005) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-7085

Faits vérifiés le 2026-10-11

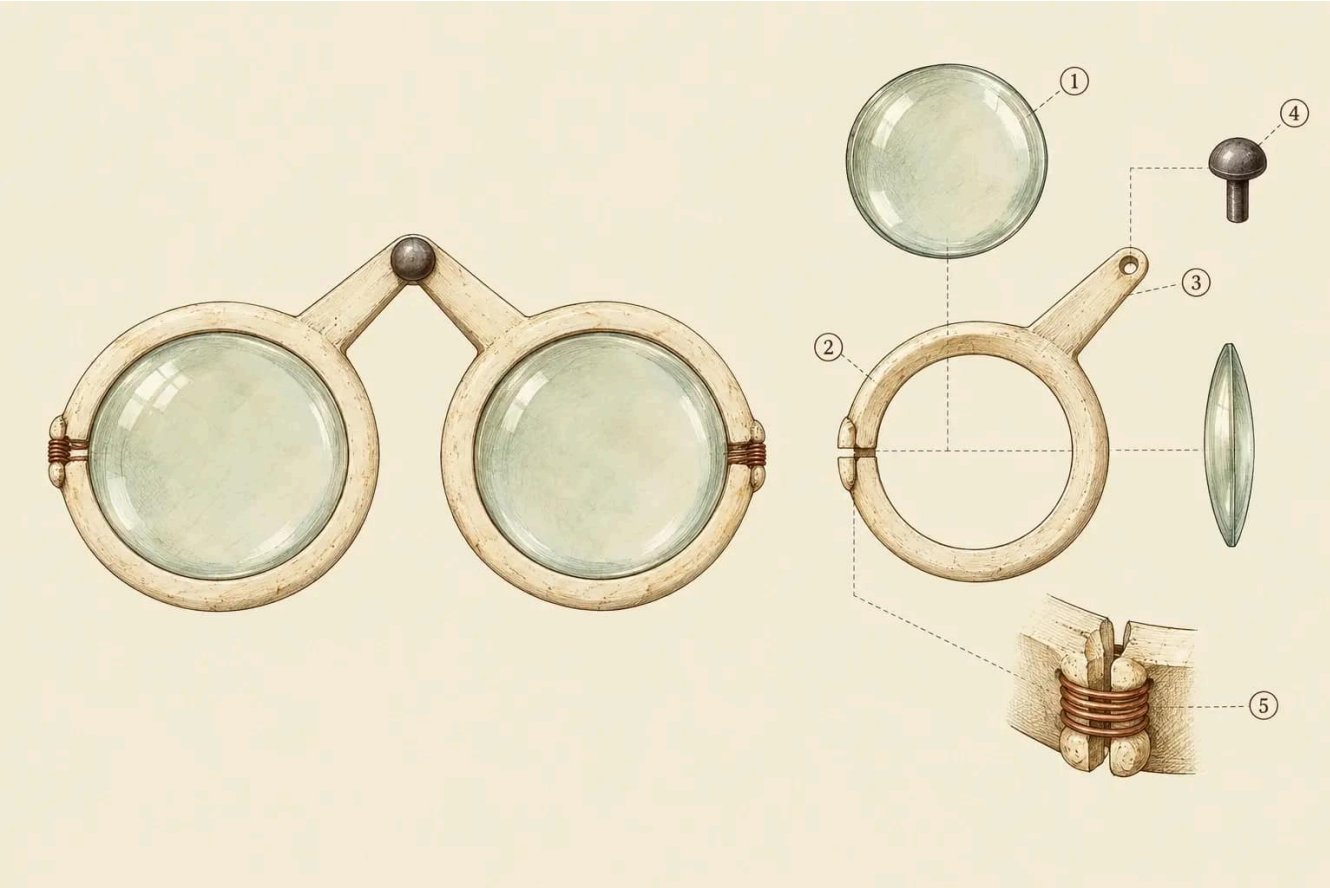
Lunettes de vue

Des verres pour lire plus longtemps

v. 1286 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite: Verre (p. 134)

Mène à: Microscope (p. 216), Lunette astronomique (p. 220)



1 Lentille de verre biconvexe 2 Cercle en os 3 Manche 4 Rivet de fer 5 Ligature en fil de cuivre

Les lunettes sont deux lentilles tenues par une monture devant les yeux pour corriger la presbytie, l'hypermétropie, la myopie ou l'astigmatisme. Apparues en Italie dans les années 1280 pour aider les personnes âgées à lire, elles ont reçu des verres pour myopes au XVe siècle et des branches au XVIIIe.

Ce que c'est

Les lunettes placent une lentille devant chaque œil, pour que la lumière arrive sur la rétine déjà déviée de la bonne quantité. Les premières aidaient les gens de quarante ans et plus à lire et à faire des travaux fins, quand la mise au point à distance de lecture était devenue difficile.

La paire de la planche est le modèle le plus ancien, les lunettes à rivet des XIVe et XVe siècles. Chaque verre est serti dans un cercle taillé dans l'os, le bois ou la corne. De chaque cercle part un court manche, et les deux manches sont réunis par un seul rivet. Il n'y a pas de branches: le rivet repose sur l'arête du nez et les cercles pincent le nez de chaque côté. Le porteur doit garder la tête droite, ou tenir ses lunettes d'une main.

Comment ça marche

Dans l'œil, un cristallin souple change de forme pour mettre au point de près ou de loin. Avec l'âge il durcit, et le point le plus proche que l'œil voit net s'éloigne : à quelques centimètres du visage chez l'enfant, il finit hors de portée des bras chez la plupart des gens de soixante ans. C'est la presbytie, et c'est pourquoi les premières lunettes furent des lunettes de lecture.

La pierre de lecture, un dôme de cristal ou de verre posé sur la page, est la loupe qui a précédé les lunettes.

Une lentille convexe, plus épaisse au centre qu'au bord, fait converger un peu la lumière avant qu'elle n'entre dans l'œil, et accomplit ainsi une partie du travail que le cristallin ne fait plus. Les opticiens mesurent cette puissance en dioptries, l'inverse de la distance focale en mètres. Un verre de lecture de +2 dioptries concentre la lumière parallèle en un point situé à 50 cm derrière lui.

La myopie est un autre défaut de mise au point, qui peut s'ajouter à la presbytie. Le globe oculaire est un peu trop long, ou son optique trop forte, et le lointain devient flou. Une lentille concave, plus mince au centre, écarte légèrement la lumière avant l'œil et repousse l'image sur la rétine. On taillait déjà de tels verres à Florence au XVe siècle. Dans l'astigmatisme, la puissance de l'œil diffère selon deux directions perpendiculaires, si bien que les lignes d'une certaine orientation sont plus floues que les autres. Le corriger demande un verre plus courbé dans un sens que dans l'autre, et de tels verres sont venus bien plus tard.

Comment les fabriquer

Une paire de lunettes à rivet comme celle de la planche demande deux lentilles, un morceau d'os ou de bois dur, du fil de cuivre et un petit rivet.

Le verre brut, fixé à la poix sur un manche de bois, était usé à l'abrasif mouillé dans un outil de bronze, puis poli sur une peau.

Se procurer les verres. Pour une paire à travers laquelle on regardera vraiment, récupérer deux verres sur des lunettes loupes du commerce. Les tailler soi-même relève de la démonstration historique : comme un lunetier, on use un disque de verre d'environ 4 cm à l'abrasif mouillé dans un outil creusé à la courbure voulue, en passant à des grains de plus en plus fins, puis on le polit au rouge à polir sur une peau ou un feutre. Pour un verre ordinaire de +2 dioptries, chaque face doit avoir un rayon de courbure d'environ 50 cm : la courbe est très faible. Un verre taillé à la main n'aura pas une puissance exacte, et son centre optique ne sera pas aligné sur vos pupilles.

Découper les cercles. Tracer au compas deux cercles un peu plus grands que les verres sur une plaque d'os ou de buis, et les découper à la scie fine en laissant sur chacun une languette pour le manche. Creuser à l'intérieur de chaque cercle une rainure en V qui recevra le bord du verre.

Fendre et ligaturer. Scier chaque cercle du côté opposé au manche. Ouvrir légèrement l'anneau, glisser le verre dans la rainure, puis refermer la fente en enroulant plusieurs tours de fil de cuivre fin autour de deux petits tenons laissés de part et d'autre.

Riveter les manches. Percer un petit trou au bout de chaque manche, les superposer et poser un rivet de cuivre ou de fer, mâté juste assez pour que les deux moitiés puissent encore se replier. Limer de petites encoches sur le

bord intérieur, là où les cercles touchent le nez, pour qu'ils tiennent mieux.

> **Sécurité.** Travaillez le verre mouillé et portez un masque anti-poussière : les poussières de verre et d'abrasif abîment les poumons. Protégez vos yeux pour percer l'os et couper le fil, et manipulez le verre taillé avec précaution. Ne regardez jamais le Soleil à travers une lentille, et n'en laissez jamais une au soleil près de papier ou de bois : elle peut mettre le feu. Cette paire est une réplique : ne la portez pas à la place de lunettes prescrites et ajustées par un professionnel de la vue, et ne conduisez jamais avec.

Histoire et évolution

On grossissait l'écriture avec des cristaux et du verre polis bien avant les lunettes. L'idée de monter une lentille dans une monture devant chaque œil est née en Italie vers 1280-1290. On ignore où exactement : on avance souvent Pise et Florence, et une ordonnance vénitienne de 1300 punissait déjà les verriers qui vendaient pour du cristal de roche des « disques pour les yeux » en verre. Dans un sermon prononcé à Florence en 1306, le dominicain Giordano da Pisa affirmait que l'art de faire des lunettes n'avait pas encore vingt ans, et qu'il avait parlé avec l'homme qui en avait fait les premières. Son nom ne nous est pas parvenu.

La plus ancienne peinture de lunettes connue est une fresque de 1352 de Tommaso da Modena, dans la salle capitulaire de San Nicolò à Trévise : un cardinal dominicain y lit avec des lunettes à rivet. Les montures elles-mêmes survivent rarement. Une paire en os du XVe siècle a été retrouvée à Trig Lane, au bord de la Tamise à Londres, à une époque où la ville importait chaque année des milliers de lunettes des Pays-Bas. En 1466, le duc de Milan en commanda deux cents paires classées par âge, signe que les puissances des verres étaient déjà assez normalisées.

Au début du XVIe siècle, les lunettes corrigeaient la myopie aussi bien que la presbytie, et des ponts en cuir ou en fanon de baleine remplaçaient le rivet. Vers 1730, on attribue à l'opticien londonien Edward Scarlett l'ajout de branches rigides qui appuyaient sur les tempes. Dans des lettres de 1784 et 1785, Benjamin Franklin décrivait ses « doubles lunettes », dont chaque verre servait pour moitié au loin et pour moitié à la lecture. Le pince-nez, tenu par un ressort, est venu au XIXe siècle, puis au XXe les montures en plastique, les verres organiques, plus légers, et plus tard les verres à haut indice, plus minces.

Doubles lunettes de la fin du XVIIIe siècle : verre de loin en haut, verre de lecture en bas.

Chiffres clés

Premier texte vénitien
Ordonnance du 2 avril 1300 sur les « disques pour les yeux » en verre

Premières lunettes peintes
1352, fresque de Tommaso da Modena à Trévise

Branches
Attribuées à l'opticien londonien Edward Scarlett, vers 1730

Témoignage sur la date
Sermon de Giordano da Pisa, Florence, 1306 : l'art « n'a pas vingt ans »

Verre de lecture courant
+2 dioptries, soit 50 cm de distance focale

Sources

1. History of spectacles · College of Optometrists, British Optical Association Museum https://www.college-optometrists.org/history-of-spectacles
2. Spectacles (bone rivet spectacles from Trig Lane) · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/v/object-407684/spectacles/
3. Medieval Eyeglasses: Wearable Technology of the Thirteenth Century · Medievalists.net https://www.medievalists.net/2016/03/medieval-eyeglasses-wearable-technology-of-the-thirteenth-century/
4. The Earliest Depiction of Eyeglasses in a Painted Work of Art · HistoryofInformation.com https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=1447
5. A Venetian ordinance on the production of lenses (2 April 1300) · HistoryofInformation.com https://historyofinformation.com/detail.php?id=2217
6. Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes (Vincent Ilardi, 2007), book description · American Philosophical Society, via Goodreads https://www.goodreads.com/book/show/1685277.Renaissance_Vision_from_Spectacles_to_Telescopes
7. Benjamin Franklin invents bifocal glasses · HISTORY.com https://www.history.com/this-day-in-history/may-23/benjamin-franklin-invents-bifocal-glasses
8. University Physics Volume 3, 2.5 The Eye · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-5-the-eye
9. Presbyopia · EyeWiki, American Academy of Ophthalmology https://eyewiki.org/Presbyopia
10. A Review of Depth of Focus in Measurement of the Amplitude of Accommodation (Burns, Allen, Edgar and Evans, Vision 2, 2018) · MDPI, via PubMed Central https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6835437/
11. Optics of the Human Eye (Atchison and Smith, 2nd edition, 2023) · CRC Press https://www.routledge.com/Optics-of-the-Human-Eye/Atchison/p/book/9781003128601
12. Schematic eyes: Gullstrand, Gullstrand-Emsley and reduced eyes (lecture notes) · Al-Mustaqbal University https://www.uomus.edu.iq/img/lectures21/MUCLecture_2024_11210775.pdf

Faits vérifiés le 2026-10-12

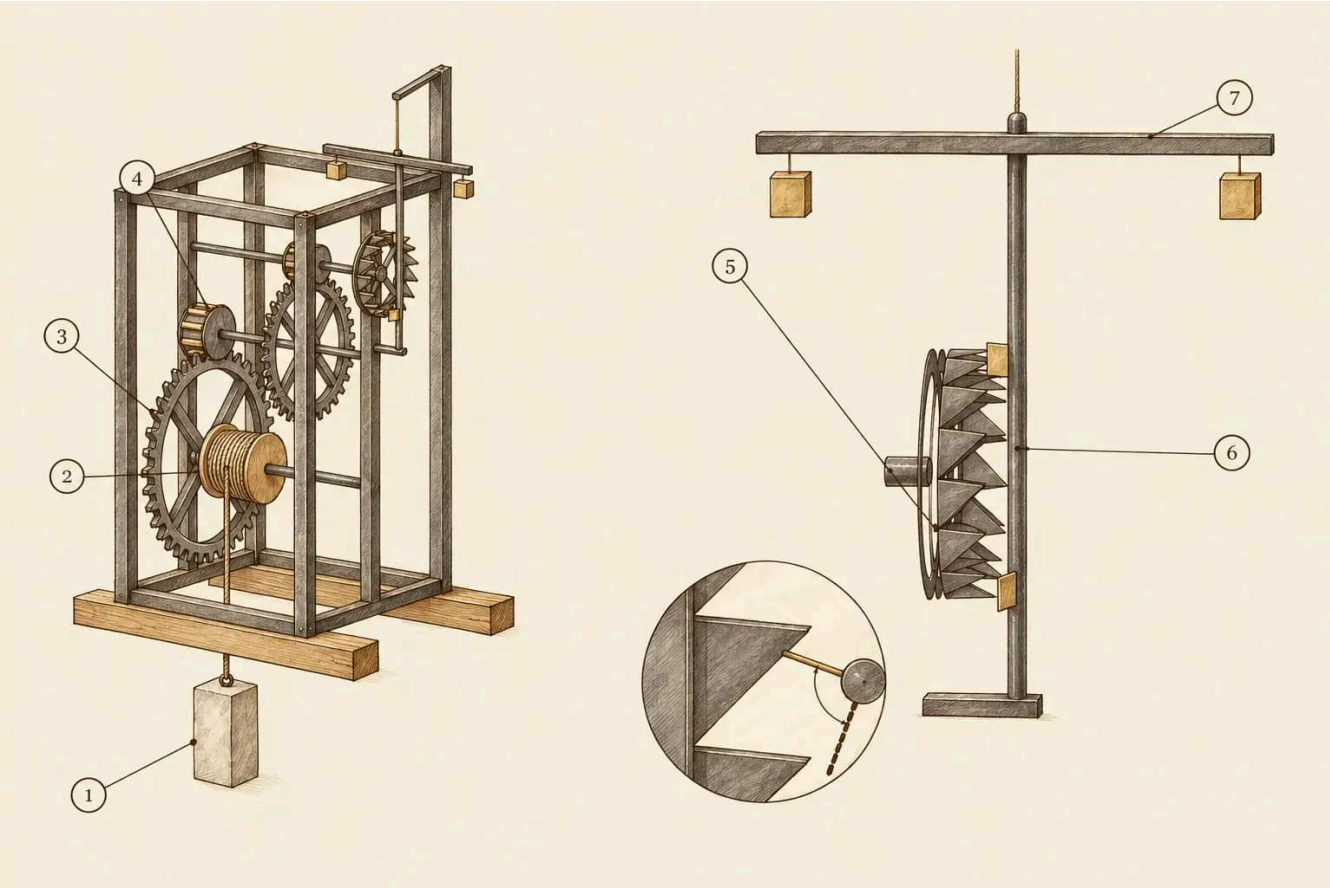
Horloge mécanique

Le temps découpé en battements égaux

v. 1300 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite : Engrenages (p. 155), Métallurgie du fer (p. 138)

Mène à : Navigation astronomique (p. 212)



1 Poids moteur 2 Tambour et corde 3 Grande roue 4 Pignon à lanterne 5 Roue de rencontre 6 Verge et palettes 7 Foliot et ses masselottes

Dans une horloge mécanique, un poids qui descend fait tourner un train d'engrenages, et un échappement ne laisse avancer ce train que par petits pas réguliers. Les premières furent construites en Europe à la fin du XIIIe siècle : de grandes machines de fer, dans les clochers, qui sonnaient les heures sur une cloche.

Ce que c'est

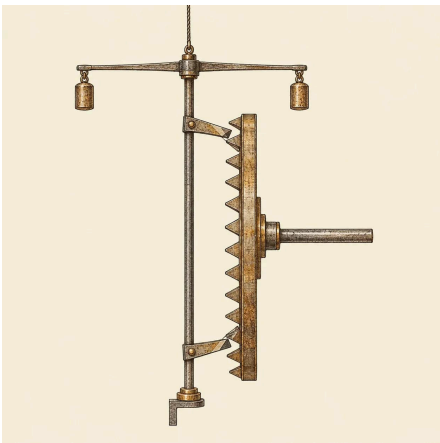
Une horloge mécanique découpe le temps en battements égaux et les compte avec des engrenages. Les premières, construites à partir de la fin du XIIIe siècle, étaient de grandes cages de fer forgé placées dans un clocher d'église ou une tour de ville. Un lourd poids de pierre les entraînait et un échappement à verge et foliot les réglait : une barre oscillante qui ne laissait les roues tourner que par petits pas réguliers. Beaucoup n'avaient pas de cadran : elles frappaient une cloche aux heures, et l'on connaissait l'heure à l'oreille.

À la cathédrale de Salisbury, une horloge de ce type fonctionne encore dans la nef. On l'identifie d'ordinaire à une horloge mentionnée sur place en 1386, et c'est pourquoi on la présente souvent comme la plus ancienne horloge en état de marche du monde ; cette datation repose sur des indices indirects, et d'autres horloges sont proposées pour ce titre. Ses roues tiennent dans une cage de fer à quatre montants assemblée par des tenons clavetés et non par des boulons. Un poids entraîne le rouage de mouvement, qui garde l'heure ; un autre entraîne le rouage de sonnerie, qui fait tinter la cloche.

Comment ça marche

Le poids pend au bout d'une corde enroulée sur un tambour de bois. En descendant lentement, il fait tourner le tambour et la grande roue fixée sur le même axe. La grande roue mène un petit pignon sur l'axe suivant, qui porte une autre roue, et ainsi de suite jusqu'à la roue d'échappement. À chaque passage d'une roue à un pignon, l'axe suivant tourne plus vite.

Livré à lui-même, le poids ferait tourner tout le rouage et tomberait en quelques secondes. L'échappement l'en empêche. La roue d'échappement est une roue de rencontre, en forme de couronne, dont les dents en dents de scie se dressent sur une face. Devant elle pend la verge, une tige verticale portant deux petites palettes, l'une qui rencontre les dents en haut de la roue, l'autre en bas, disposées à peu près à angle droit. Une dent écarte la palette du haut et fait tourner la verge ; la palette du bas vient alors se placer devant une dent, de l'autre côté de la roue, qui la repousse en sens inverse. La verge oscille ainsi, et la roue avance d'une demi-dent à chaque mouvement dans un sens, d'une dent entière à chaque aller-retour.



L'échappement à verge vu de profil, où les dents du pourtour de la roue de rencontre s'alignent en une seule colonne : la roue pousse tour à tour les deux palettes, et le foliot lesté va et vient au sommet de la verge.

Le foliot est une barre horizontale fixée en travers du sommet de la verge, avec un petit poids suspendu près de chaque bout. Son inertie ralentit chaque battement. En écartant les poids, on ralentit le battement et l'horloge retarde ; en les rapprochant, elle avance. Le foliot n'a pas de période propre : la marche varie aussi avec la force du poids moteur, les frottements et l'état de l'huile, et l'écart courant était de l'ordre d'un quart d'heure par jour. Le gardien remettait l'horloge à l'heure d'après un cadran solaire et remontait les poids chaque jour.

Comment la construire

On peut fabriquer à la main, en contreplaqué et en tourillons de bois dur, une maquette d'échappement à verge et foliot. Elle bat et montre comment l'échappement retient un poids qui descend ; sans cadran, elle ne donne pas l'heure. Ce qui suit résume les étapes : pour la forme des dents et l'entraxe des axes, suivre un plan coté publié pour une maquette d'échappement en bois.

Bâtir la cage. Deux montants d'environ 40 cm reliés par des traverses, percés pour trois axes horizontaux superposés aux entraxes du plan. Prendre des tourillons comme axes et garnir les trous de courts morceaux de tube de laiton pour qu'ils tournent librement. Visser la cage sur un socle lourd ou une console murale pour qu'elle ne puisse pas basculer.

Faire le rouage. Sur l'axe du bas, un tambour pour la cordelette et la grande roue ; sur l'axe du milieu, un pignon à lanterne en tourillons et une deuxième roue ; sur l'axe du haut, un autre pignon à lanterne et la roue de rencontre.

Un pignon à lanterne : des tiges rondes entre deux disques, faciles à faire à la main, engrènent avec les dents de la grande roue.

Chaque roue doit engrener avec son pignon sans coincer ni sauter : découper les dents selon le profil du plan et les limer.

Faire l'échappement. La roue de rencontre demande un nombre impair de dents, 15 étant courant, dressées sur une face : les découper sur le bord d'un court anneau de contreplaqué mince ou de bois dur, puis coller l'anneau sur la face d'un disque. Monter la verge, un tourillon bien droit, à la verticale devant la roue, avec deux palettes minces à environ 90 degrés l'une de l'autre, à la hauteur du haut et du bas de la roue. Le nombre impair de dents fait qu'une palette rencontre une pointe pendant que l'autre fait face à un creux. Fixer en travers du sommet de la verge le foliot, une barre légère d'environ 30 cm munie de deux poids coulissants.

Régler sans le poids. Faire tourner le rouage à la main, un doigt sur le tambour, et vérifier que les palettes travaillent tour à tour : une dent du haut échappe, puis une dent du bas vient buter sur l'autre palette, sans dent sautée ni blocage. Ne tordre ou limer les palettes que poids retiré. Enrouler ensuite sur le tambour une cordelette dont la charge admise dépasse largement le poids, en attacher le bout au tambour, suspendre le poids indiqué par le plan, souvent 1 à 2 kg pour un petit modèle en bois. Pour régler le battement, décrocher ou soutenir le poids, déplacer un peu les masselottes du foliot, laisser de nouveau pendre le poids et compter les battements sur une minute ; recommencer jusqu'à obtenir un battement régulier.

> **Sécurité.** Si une palette lâche, le rouage s'emballe et le poids tombe : retirez ou soutenez toujours le poids avant de toucher à l'échappement, et faites-le descendre dans un guide fermé, tube ou caisson, qui s'arrête au sol. Gardez mains, pieds et animaux hors de sa course. Serrez la pièce et gardez les mains derrière la lame en découpant les dents ; portez des lunettes de protection pour percer.

Histoire et évolution

Clepsydres et cadrans solaires mesuraient le temps depuis des millénaires avant l'horloge mécanique. Le pas décisif, un mécanisme qui laisse un poids descendre par saccades régulières, fut franchi quelque part en Europe à la fin du XIIIe siècle, et de grandes horloges publiques sont attestées dans des villes italiennes dans la première moitié du XIVe. Des horloges apparaissent alors dans les archives des cathédrales et des abbayes, mais le même mot latin, horologium, désignait aussi les horloges à eau, si bien qu'on ne peut nommer la première horloge mécanique. À la fin du XIVe siècle, de grandes horloges de fer fonctionnaient dans bien des cathédrales ; le mouvement de celle de Wells, de 1392, est aujourd'hui au Science Museum de Londres, tandis que son cadran est resté dans la cathédrale.

Le grand changement vint en 1656-1657, quand Christiaan Huygens, reprenant une idée de Galilée, régla une horloge par un pendule. Un pendule oscille en un temps presque constant quelle que soit la force motrice. La première horloge à pendule de Huygens s'écartait de moins d'une minute par jour, les suivantes de moins de dix secondes. Beaucoup d'horloges de clocher furent transformées ; celles de Salisbury et de Wells perdirent leur foliot au profit d'un pendule, et celle de Salisbury reçut une verge et un foliot reconstitués lors de sa restauration en 1956. Vers 1675, le ressort spiral donna aux montres un régulateur doté d'une période propre ; leur écart tomba à une dizaine de minutes par jour, loin d'une horloge à pendule mais bien mieux qu'auparavant.

Le rouage de sonnerie tire le fil, le marteau frappe la cloche, et l'on entend l'heure dans toute la ville.

Chiffres clés

Premières horloges mécaniques
Europe, fin du XIIIe siècle

Plus ancienne horloge en marche (revendiquée)
Cathédrale de Salisbury, vers 1386 ; sans cadran, sonne les heures

Écart d'une horloge à foliot
De l'ordre d'un quart d'heure par jour, selon la facture et l'entretien

Horloge à pendule (Huygens)
1656 ; moins d'une minute par jour au début, puis moins de 10 secondes

Sources

1. What to see: the world's oldest clock · Salisbury Cathedral https://www.salisburycathedral.org.uk/discover/what-to-see/
2. Wells Cathedral clock, 1392 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co1347/wells-cathedral-clock-1392
3. A walk through time: the revolution in timekeeping · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/walk-through-time/walk-through-time-revolution
4. Clocks in the Scientific Revolution · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/article/2315/clocks-in-the-scientific-revolution/
5. Oldest clock · Guinness World Records https://guinnessworldrecords.com/world-records/oldest-clock
6. Model of verge escapement with foliot regulator · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/ModelVergeEscapementWithFoliotRegulator.html
7. Salisbury Cathedral clock · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Salisbury_Cathedral_clock
8. Dynamics of the verge and foliot clock escapement (P. Hoyng and A. C. T. Nieuwenhuizen) · arXiv https://arxiv.org/abs/1604.06681
9. Turret clock, Cotehele (c. 1490) · National Trust Collections https://www.nationaltrustcollections.org.uk/object/347888
10. Cotehele clock · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Cotehele_clock
11. Before Big Ben (Jonathan Betts) · Building Conservation https://buildingconservation.com/articles/bigben/bigben.html

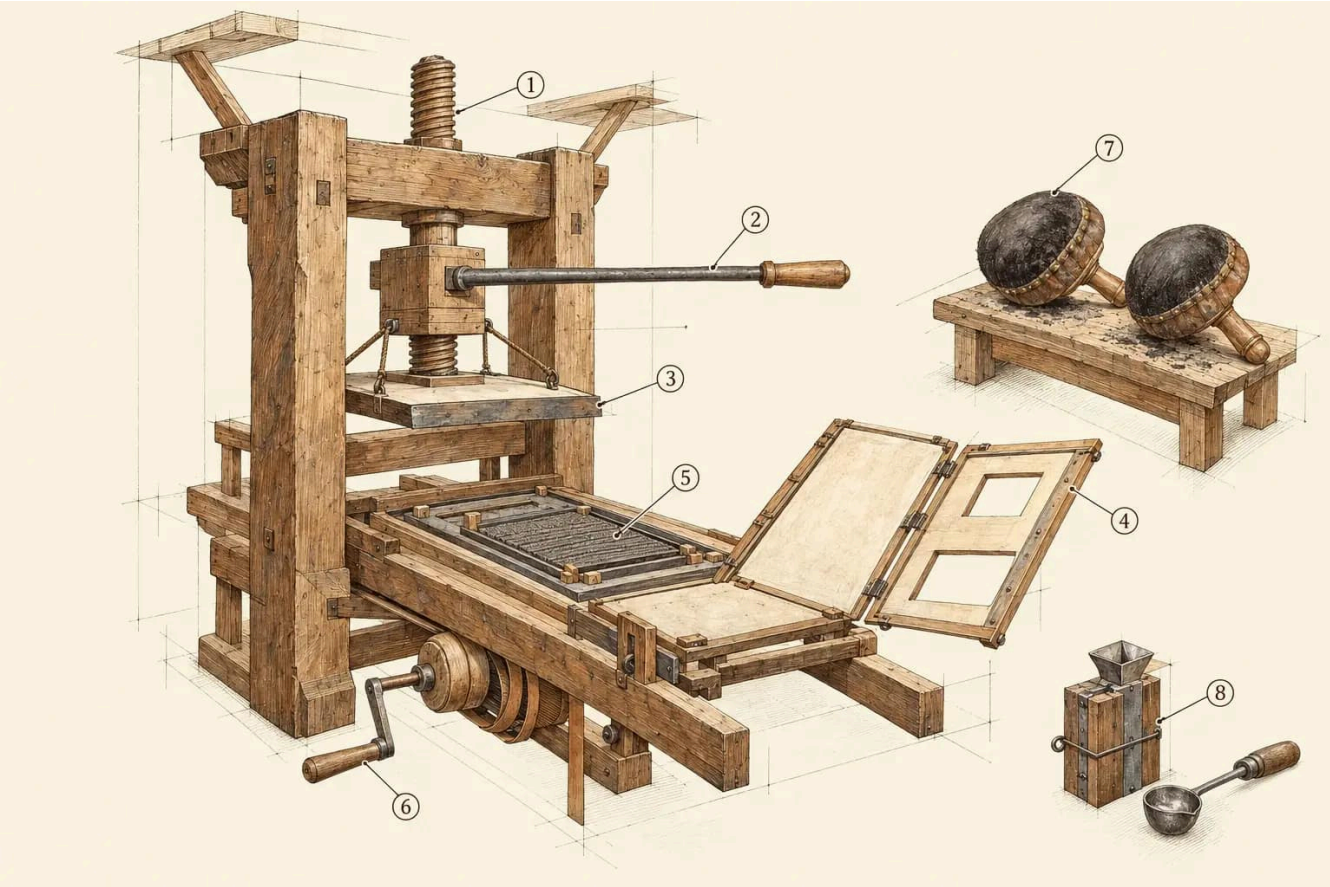
Faits vérifiés le 2026-10-12

Presse à imprimer

Des caractères mobiles, copiés par milliers

v. 1440 · Moyen Âge · Artisanat & cités

Nécessite: Papier (p. 172), Métallurgie du fer (p. 138), Écriture (p. 87), Acier (p. 142)



1 Vis 2 Barreau 3 Platine 4 Tympan et frisquette 5 Forme posée sur le marbre 6 Manivelle du train (moulinet) 7 Balles à encrer 8 Moule à main pour fondre les caractères

La presse à imprimer applique, grâce à une vis de bois, des caractères de métal encrés sur du papier humide: une même page peut ainsi être tirée des centaines de fois par jour. Gutenberg l'associe vers 1440 à des caractères mobiles fondus et à une encre grasse, et en cinquante ans l'imprimerie gagne toute l'Europe.

Ce que c'est

Une presse à imprimer dépose l'encre sur le papier par pression. Des lettres fondues en métal sont alignées pour former une page, encrées, recouvertes d'une feuille humide et serrées sous une plaque plane. La feuille reçoit l'image inversée des caractères, qui se lit donc à l'endroit.

La machine elle-même n'avait rien de neuf: les presses à vis servaient depuis l'Antiquité romaine à presser le raisin et l'olive, et les papetiers s'en servaient pour essorer leurs feuilles. La nouveauté tient à l'association de la presse avec des caractères de métal réutilisables, fondus vite et à des dimensions exactes, avec une encre qui accroche au métal et avec un papier bon marché.

Comment ça marche

Tout commence par les caractères. Le graveur taille à l'envers la forme d'une lettre au bout d'une tige d'acier, le poinçon. Frappé dans un petit bloc de cuivre, celui-ci y laisse une lettre en creux : la matrice. On place la matrice au fond d'un moule à main, le fondeur y verse le métal en fusion et, un instant plus tard, ouvre le moule pour en faire tomber un caractère, une petite tige portant la lettre en relief à son extrémité.

Les deux moitiés du moule coulissent selon la largeur de chaque lettre ; la hauteur, elle, ne change jamais.

Le moule de Gutenberg s'ajuste pour un « i » étroit comme pour un « M » large sans modifier la hauteur du caractère. C'est ce qui permet à des milliers de pièces séparées de tenir ensemble et d'imprimer de façon égale. L'alliage de plomb, d'étain et d'antimoine fond à basse température, reproduit les détails fins et s'use lentement.

Bourrées de laine ou de crin, les balles servaient à tamponner les caractères.

Le compositeur prend les caractères dans la casse, les aligne ligne après ligne dans un composteur et monte ses pages. Celles-ci sont ensuite bloquées par des coins dans un cadre de fer, le châssis. L'ensemble, la forme, repose sur une pierre plane, le marbre, dans le train de la presse.

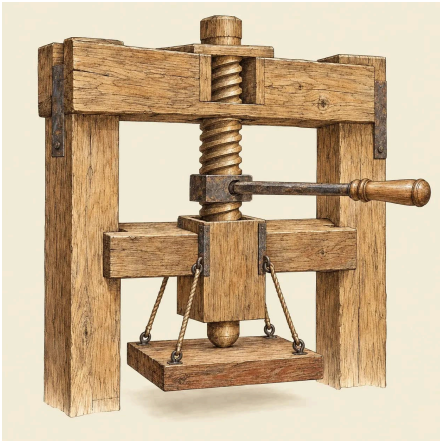
Un premier ouvrier tamponne les caractères avec deux balles chargées d'une encre de noir de fumée et d'huile de lin. Son compagnon pose une feuille humide sur le tympan, un cadre à charnière tendu de parchemin, et rabat dessus la frisquette, qui protège les marges. Tympan et frisquette se replient sur la forme. Un tour de manivelle fait rentrer le train sous la platine. On tire sur le barreau : la vis tourne d'une fraction de tour, la platine descend et la feuille est imprimée.

Comment la fabriquer

Une presse demande un charpentier, un forgeron et quelqu'un qui sache graver des lettres.

Monter le bâti. Reliez deux lourds montants de chêne par un chapeau en haut et une traverse plus bas, et étayez le tout contre le sol et le plafond. Si le bâti fléchit, l'impression devient floue.

Faire la vis et la platine. Une vis taillée dans un bois dur et serré, comme le buis ou le poirier, avec un filet grossier, tourne dans un écrou fixé au chapeau. Sous l'écrou, la vis tourne dans un manchon de bois carré, la boîte, qui coulisse dans une planche de guidage, la tablette, sans pouvoir pivoter. La platine plate est suspendue à la boîte par des cordes, pour descendre droit sans tourner.



La boîte coulisse dans la tablette sans tourner : pendue à ses cordes, la platine descend bien droit.

Installer le train. Une pierre lisse, sertie dans un caisson de bois, glisse sur des rails sous la platine. Un moulinet, axe muni d'une manivelle et de sangles de cuir, la fait entrer et sortir.

Fondre les caractères. C'est un travail de fondeur qualifié. Gravez des poinçons d'acier, frappez-les dans le cuivre et coulez dans un moule en

deux parties, avec les précautions ci-dessous. Sans fonderie, des lettres taillées dans un bois dur, travaillé en bois de bout, imprimeront aussi, plus lentement et moins régulièrement.

Préparer l'encre. Broyez du noir de fumée dans un vernis d'huile de lin, c'est-à-dire de l'huile déjà épaissie par la chaleur, jusqu'à la consistance du miel. Achetez ce vernis tout prêt ou faites-le préparer par quelqu'un d'expérimenté, car chauffer de l'huile expose au feu.

Humidifier le papier. Un papier légèrement humide prend bien mieux l'encre. Laissez-le une nuit entre des feuilles mouillées.

> **Sécurité.** Ne fondez des caractères que dans un atelier équipé pour le plomb en fusion : creuset à température contrôlée, aspiration des fumées, écran facial, tablier et gants de cuir. Le métal en fusion gicle violemment au contact de l'eau ou d'un outil humide : chauffez d'avance louches et moules. Le plomb est toxique : ne mangez jamais en travaillant, gardez crasses et poussières dans des récipients fermés et lavez-vous les mains ensuite. Les chiffons imbibés d'huile de lin peuvent s'enflammer seuls en séchant : étalez-les à plat dehors ou gardez-les dans une boîte en métal fermée remplie d'eau. Tenez-vous hors de la course du barreau.

Histoire et évolution

Les caractères mobiles naissent en Chine. Dans les années 1040, Bi Sheng imprime avec des caractères en argile cuite, procédé que décrit Shen Kuo. Les imprimeurs coréens fondent ensuite des caractères en bronze, et le plus ancien livre conservé imprimé en caractères métalliques, le *Jikji*, date de 1377. Imprimer des caractères chinois, en Chine comme en Corée, demande des milliers de types différents, ce qui rend la méthode coûteuse.

Johannes Gutenberg, artisan de Mayence formé au travail des métaux, travaille à l'imprimerie à Strasbourg d'environ 1437 à 1444. Lors d'un procès de 1439, des témoins parlent d'une presse, de plomb et de formes servant à une entreprise secrète, où l'on voit en général les premiers essais d'imprimerie. De retour à Mayence, avec l'argent de Johann Fust, il imprime la Bible à 42 lignes entre 1452 et 1455 environ. On en tire quelque 180 exemplaires, surtout sur papier, les autres sur vélin ; 48 ou 49 sont parvenus jusqu'à nous.

Le métier se répand vite. En 1480, on imprime dans environ 110 localités, et en 1500 dans quelque 270 villes, qui ont produit plus de vingt millions d'exemplaires.

Vers 1800, la presse Stanhope, entièrement en fer, double le rendement. En 1814, la presse à cylindre mue par la vapeur de Friedrich Koenig imprime le *Times* à 1 100 feuilles par heure.

Chiffres clés

Premiers essais d'imprimerie de Gutenberg
Fin des années 1430, probablement à Strasbourg

Bible à 42 lignes
Vers 1455, environ 180 exemplaires, dont 48 ou 49 conservés

Alliage des caractères
Plomb, étain et antimoine

Rendement d'une presse en bois vers 1600
De 1 500 à 3 600 impressions environ par journée de travail

Villes d'Europe ayant imprimé avant 1500
Environ 270

Sources

1. Printing press · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Printing_press
2. The Gutenberg Bible · Library of Congress https://www.loc.gov/exhibits/bibles/interactives/gutenberg/index.html
3. Johannes Gutenberg (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/johannes-gutenberg/
4. Shen Kuo · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Shen_Kuo
5. Joseph Moxon, Mechanick Exercises on the Whole Art of Printing (1683): the press · Transcription by R. Holme https://rholme.taths.org.uk/texpic/20/20_02a/20_02a.htm
6. Making Books: the Renaissance and Today, glossary of the Beaver Press · MIT OpenCourseWare https://ocw.mit.edu/courses/21h-343j-making-books-the-renaissance-and-today-spring-2016/pages/end-view

Faits vérifiés le 2026-10-11

IV

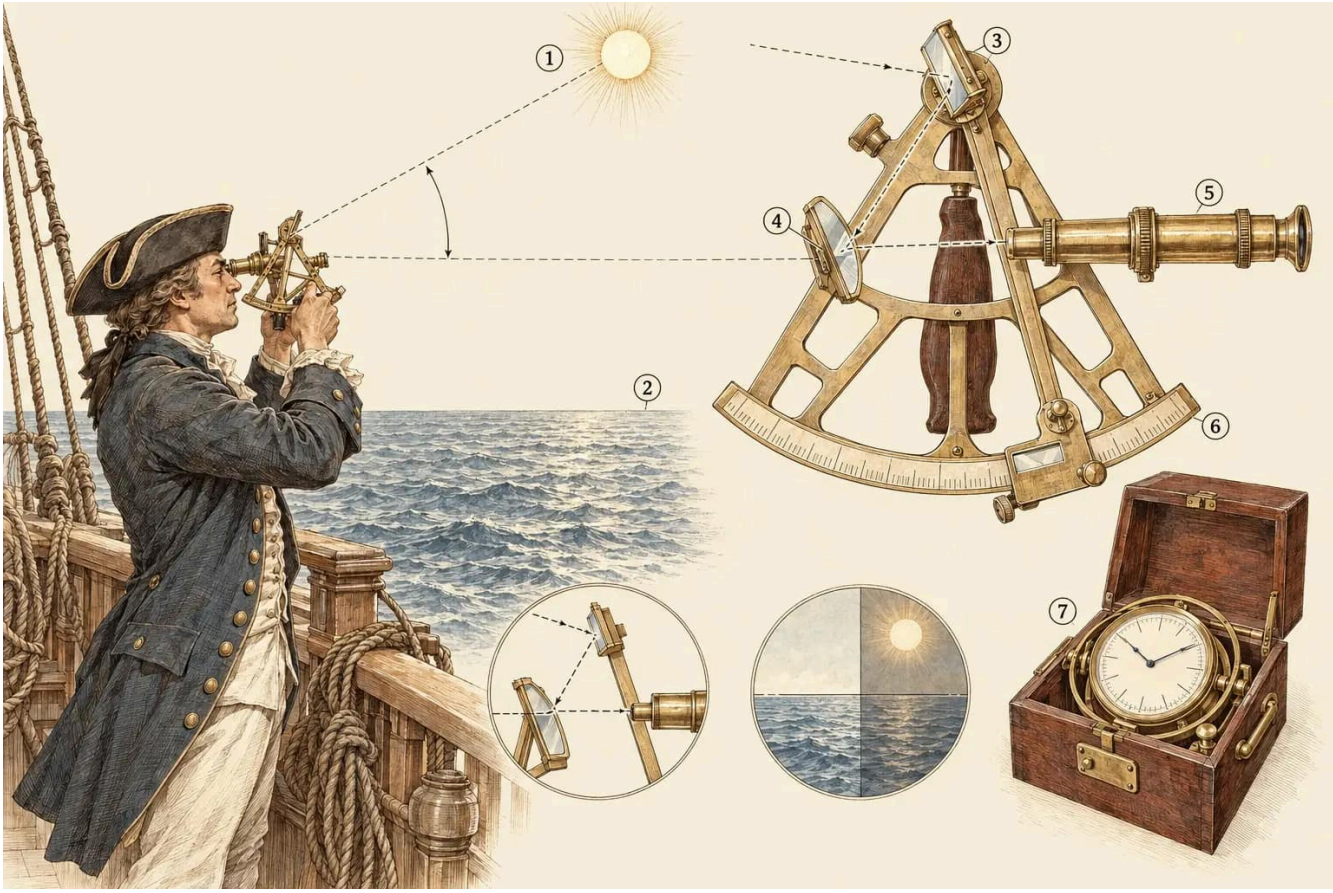
Science & industrie

Navigation astronomique

Le point du navire lu dans le ciel

v. 1460 · Renaissance · Science & industrie

Nécessite : Boussole (p. 196), Voile (p. 91), Numération de position (p. 99), Mesures et étalons (p. 129), Horloge mécanique (p. 203)



1 Soleil 2 Horizon de la mer 3 Grand miroir 4 Petit miroir, à moitié étamé 5 Lunette de visée 6 Limbe gradué 7 Chronomètre de marine

La navigation astronomique situe un navire d'après la hauteur du Soleil, de la Lune et des étoiles au-dessus de l'horizon. La latitude se tire de l'étoile Polaire, que les pilotes portugais mesurent au quadrant vers 1460, ou du Soleil de midi ; la longitude exige l'heure d'un méridien de référence, fournie à partir des années 1760 par les chronomètres et les tables lunaires.

Ce que c'est

Hors de vue des côtes, le compas et la vitesse estimée tiennent le cap, mais les erreurs s'accumulent. Le ciel permet de vérifier, car la hauteur d'une étoile ou du Soleil au-dessus de l'horizon dépend de l'endroit où l'on se trouve.

La latitude, la distance au nord ou au sud de l'équateur, vient d'abord : les pilotes de l'océan Indien la tirent de la Polaire, aux doigts ou au kamal, et les Européens emportent quadrants et astrolabes en mer au XVe siècle. La longitude dépend de l'heure et reste un problème difficile jusqu'au XVIIIe. La planche montre un sextant et un chronomètre de marine de cette dernière époque.

Comment ça marche

L'étoile Polaire se trouve tout près du point du ciel situé dans l'axe de la Terre. Au pôle Nord, elle est presque au zénith ; sur l'équateur, presque sur l'horizon. Entre les deux, sa hauteur vaut à peu près la latitude. Du temps de Colomb, elle était à 3,5° du pôle et les pilotes corrigeaient leurs lectures ; aujourd'hui l'écart est inférieur à un degré.

Au sud de l'équateur, on se sert du Soleil à midi vrai, quand il culmine. Son angle avec l'équateur céleste, la déclinaison, varie au fil de l'année entre 23,4° N et 23,4° S environ et se calcule d'avance. Avec le Soleil de midi au sud, la latitude vaut 90° moins sa hauteur, plus la déclinaison, le sud comptant négativement. Avec le Soleil au nord, comme toujours au sud des tropiques, la latitude vaut la déclinaison moins (90° moins la hauteur).

L'astrolabe nautique était coulé lourd et ajouré pour que le vent ne le fasse pas osciller.

Sur le premier quadrant, un fil à plomb pend devant une graduation pendant qu'on vise l'étoile le long d'un bord. L'astrolabe nautique pend à un anneau ; pour le Soleil, le navigateur tourne l'alidade jusqu'à ce qu'un rayon traverse la pinnule du haut et tombe sur celle du bas. Les deux oscillent sur un pont qui roule, et des erreurs de plusieurs degrés étaient courantes.

L'octant et le sextant mesurent à partir de l'horizon de la mer. La lumière du Soleil frappe le grand miroir porté par le bras mobile, se réfléchit sur le petit miroir, puis entre dans la lunette. Une moitié du petit miroir est transparente : on voit l'horizon à travers, à côté du Soleil réfléchi. Verres teintés rabattus, le navigateur déplace le bras jusqu'à ce que le bord inférieur du Soleil touche l'horizon, puis lit le limbe. Des tables corrigent ensuite la hauteur de l'œil, la réfraction et le demi-diamètre du Soleil, environ 16′. La double réflexion double l'angle, si bien qu'un arc d'un sixième de cercle mesure jusqu'à 120°.

Pour la longitude, la Terre tourne de 15° par heure. Si le Soleil passe au méridien du lieu quand une horloge réglée sur Greenwich marque 15 h, le navire est à 45° environ à l'ouest de Greenwich, avant la correction de l'équation du temps : selon la saison, le Soleil avance ou retarde jusqu'à 16 minutes. Tout le problème était une horloge qui reste juste en mer. L'autre méthode, la distance lunaire, compare l'angle mesuré entre la Lune et une étoile brillante à des tables imprimées pour retrouver l'heure de référence.

Entre deux observations, l'estime tirée du compas, du loch et de l'horloge est reportée sur la carte ; chaque point astronomique la corrige.

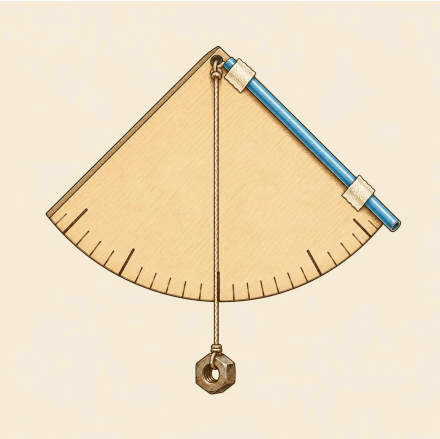
Comment s'y prendre

Un quadrant en carton donne la latitude à un ou deux degrés près, soit 100 à 200 km.

Fabriquer le quadrant. Découper dans un carton rigide un quart de cercle d'environ 15 cm de rayon. Au rapporteur, graduer l'arc de 0 sur un bord droit à 90 sur l'autre. Fixer une paille le long du bord marqué 90. Suspendre au coin un fil lesté d'un écrou. Le fil indique alors l'angle de la paille au-dessus de l'horizontale.

Mesurer la Polaire. Par nuit claire, dans l'hémisphère Nord, prolonger la ligne des deux étoiles du bout de la casserole de la Grande Ourse d'environ cinq fois leur écart pour trouver la Polaire. La viser dans la paille, laisser le fil se stabiliser et lire. La moyenne de cinq lectures donne une latitude approchée.

Ou mesurer le Soleil de midi par l'ombre. Ne jamais viser le Soleil. Planter un bâton droit sur un sol plat et vérifier au fil à plomb qu'il est vertical. Autour de midi, marquer le bout de l'ombre toutes les cinq minutes :



On vise dans la paille et on lit où le fil croise la graduation.

l'ombre la plus courte donne le midi vrai, rarement à 12 h à la montre. La hauteur du Soleil est l'angle dont la tangente vaut la hauteur du bâton divisée par cette ombre ; on peut aussi tracer le triangle à l'échelle et mesurer l'angle au rapporteur.

Corriger selon la date. Chercher la déclinaison du Soleil du jour dans des éphémérides, positive au nord. Au nord des tropiques, latitude = 90° − hauteur + déclinaison. Le 11 avril, la déclinaison vaut environ +8°. Si un bâton de 100 cm donne une ombre minimale de 77 cm, la hauteur est d'environ 52,4° et la latitude de 90 − 52,4 + 8 = 45,6° N, proche des 45,8° de Lyon. Comparer ensuite avec une carte.

> **Sécurité.** Ne jamais regarder le Soleil, ni à l'œil nu ni à travers une paille, un tube, des jumelles ou un viseur, même un instant ; les lunettes de soleil ne protègent pas et la lésion est définitive. La nuit, sortir à deux, emporter une lampe et rester loin des bords de falaise, des quais, des berges et de l'eau.

Histoire et évolution

Les navigateurs du Pacifique naviguaient sans instruments, en se guidant sur les points de lever et de coucher des étoiles et en jugeant la latitude à la hauteur de la Croix du Sud. En 1976, Mau Piailug a conduit ainsi la pirogue Hōkūleʻa de Hawaï à Tahiti.

Avec le kamal des pilotes de l'océan Indien, un nœud tenu entre les dents fixait la distance à une planchette dont les bords allaient de l'horizon à l'étoile. Ahmad ibn Majid, d'Oman, a consigné ce savoir en 1490.

Le kamal : chaque nœud correspondait à la hauteur de la Polaire dans un port connu.

Diogo Gomes écrit avoir pris la Polaire au quadrant lors d'un voyage en Guinée vers 1460, mais ses dates sont incertaines. Après le passage de l'équateur, dans les années 1470, les Portugais se fient au Soleil de midi, à l'astrolabe et aux tables de déclinaison d'Abraham Zacuto, imprimées à Leiria en 1496. L'arbalestrille puis le quartier de Davis, vers 1594, suivent. John Hadley présente son octant à la Royal Society en 1731. La montre H4 de John Harrison est essayée en mer en 1761 ; le Nautical Almanac de Nevil Maskelyne, paru en 1766 pour l'année 1767, publie des tables lunaires. Les signaux horaires réguliers par radio commencent en 1904, et le GPS devient pleinement opérationnel en 1995.

Chiffres clés

Un degré de latitude
Environ 111 km (60 milles marins)

Rotation de la Terre
15° de longitude par heure, 1° toutes les 4 minutes

Déclinaison du Soleil
Entre 23,4° N et 23,4° S environ au fil de l'année

Polaire mesurée au quadrant en mer
Diogo Gomes, vers 1460

Octant de Hadley
Présenté à la Royal Society le 13 mai 1731

Sources

1. What is a mariner's astrolabe? · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/stories/space-astronomy/what-mariners-astrolabe
2. Quadrant · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/object/quadrant/
3. Mariner's astrolabe · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/?p=211
4. Back staff · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/object/back-staff/
5. Martin Behaim: his life and his globe (E. G. Ravenstein, 1908), pp. 15–17 · Universitätsbibliothek Freiburg https://dl.ub.uni-freiburg.de/diglit/ravenstein1908/0029/ocr
6. Martin Behaim: his life and his globe, Zacuto's Almanach · Universitätsbibliothek Freiburg https://dl.ub.uni-freiburg.de/diglit/ravenstein1908/0031/ocr
7. The navigator Ahmad ibn Majid · AramcoWorld https://archive.aramcoworld.com/issue/200504/the.navigator.ahmad.ibn.majid.htm
8. The Star Compass · Polynesian Voyaging Society https://worldwidevoyage.hokulea.com/education-at-sea/polynesian-navigation/the-star-compass/
9. Wayfinding revival · Science Learning Hub, University of Waikato https://www.sciencelearn.org.nz/resources/631-wayfinding-revival
10. John Hadley · MacTutor, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/DNB/Hadley.html
11. Octant / sextant · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/multimedia/OctantSextantBis.html
12. Who was John Harrison? · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/discover/explore/longitude-found-john-harrison
13. John Harrison · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/john-harrison
14. Nevil Maskelyne and the lunar method · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/stories/topics/longitude-found-nevil-maskelyne-lunar-method
15. The Evolution of Time Measurement, Part 5: Radio Controlled Clocks (M. A. Lombardi, 2012) · NIST https://tf.nist.gov/general/pdf/2536.pdf
16. The System: Celebrating 20 Years of GPS · GPS World https://www.gpsworld.com/the-system-celebrating-20-years-of-gps/
17. Longitude and Local Noon · ESO, Sea and Space https://www.eso.org/public/outreach/eduoff/seaspace/navigation/navastro/navastro-5.html
18. Declination of the Sun · Plymouth State University https://vortex.plymouth.edu/dept/tutorials/sun/sun4a.html
19. The American Practical Navigator (Pub. 9), chapter 14: Instruments for celestial navigation · National Geospatial-Intelligence Agency https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/05-%20Part%203-%20Celestial%20Navigation/Chapter%2014-%20Instruments%20For%20Celestial%20Navigation.pdf
20. The American Practical Navigator (Pub. 9), appendix B: Calculations and conversions (dip of the horizon) · National Geospatial-Intelligence Agency https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/13-%20Appendices/Appendix%20B-%20Calculations%20and%20Conversions.pdf
21. Mate sextant, Kelvin & Hughes, 1967 (NAV1204) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-43416
22. The calculation of astronomical refraction in marine navigation (G. G. Bennett, 1982) · Journal of Navigation https://doi.org/10.1017/S0373463300022037
23. General Solar Position Calculations · NOAA Global Monitoring Laboratory https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF

Faits vérifiés le 2026-10-14

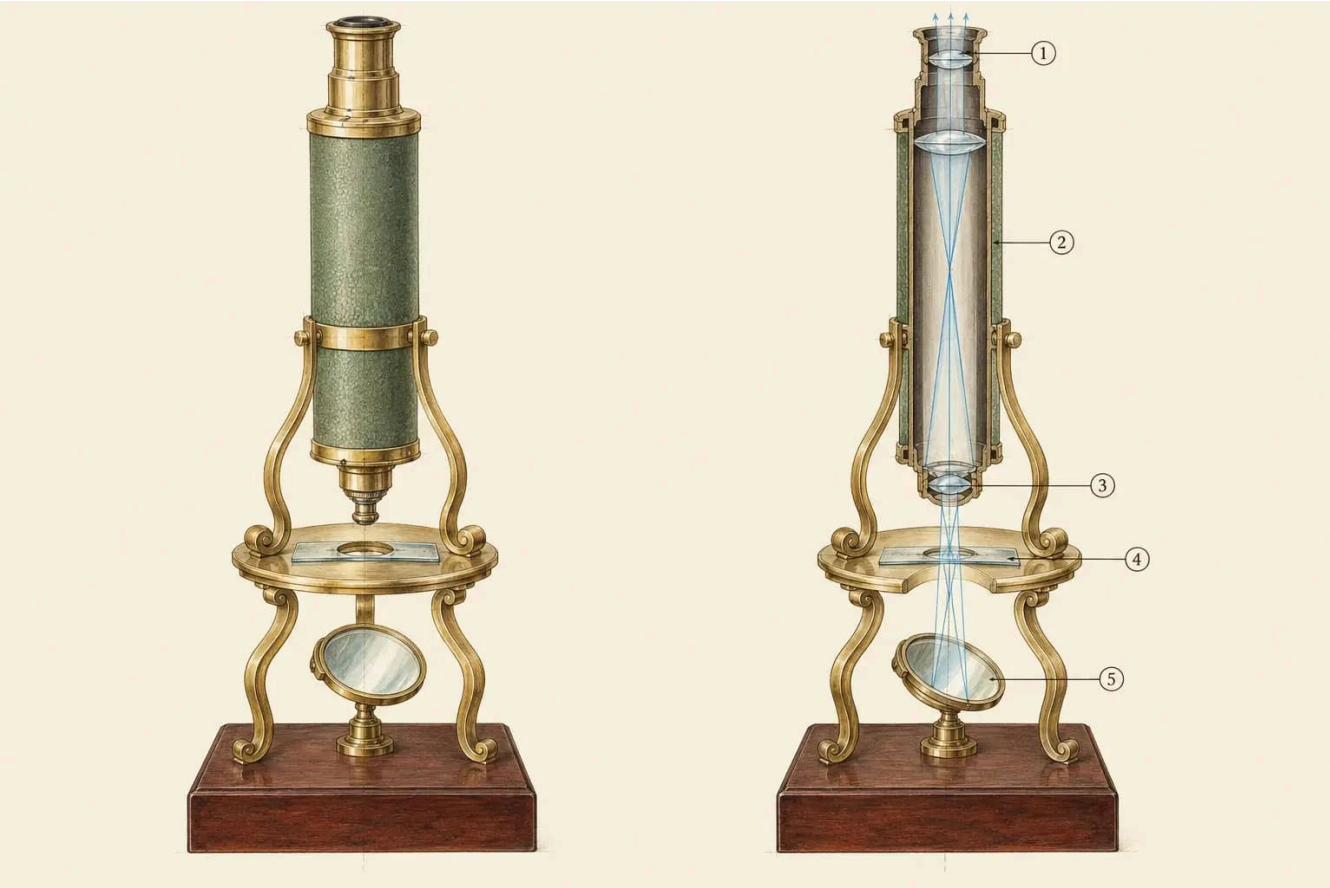
Microscope

Un monde trop petit pour l'œil

v. 1590 · Renaissance · Science & industrie

Nécessite: Lunettes de vue (p. 199)

Mène à: Hygiène et antisepsie (p. 301)



1 Oculaire 2 Tube 3 Objectif 4 Platine et lame 5 Miroir concave

Un microscope se sert d'une ou de plusieurs lentilles pour montrer ce qui est trop petit pour l'œil. Les instruments composés, deux lentilles dans un tube, apparaissent aux Pays-Bas vers 1600, et dans les années 1670 les minuscules lentilles simples d'Antoni van Leeuwenhoek révèlent pour la première fois les bactéries et les êtres unicellulaires.

Ce que c’est

Un microscope montre des détails trop petits pour l’œil nu, d’un dixième de millimètre jusqu’à quelques millièmes. Le plus simple, le microscope simple, n’est qu’une lentille très forte tenue tout près de l’œil. Le microscope composé emploie deux lentilles ou groupes de lentilles dans un tube: la première forme une image agrandie, la seconde agrandit encore cette image.

L’instrument de la planche est un microscope composé du type mis au point vers 1725-1730 par le fabricant londonien Edward Culpeper. Trois pieds de laiton cintrés posés sur un socle de bois portent la platine; trois autres

portent le manchon dans lequel le tube coulisse pour la mise au point. Sous la platine, un miroir concave recueille la lumière du jour ou d'une bougie et la renvoie vers le haut, à travers la préparation.

Comment ça marche

La préparation, souvent une coupe fine ou une goutte de liquide sur une lame de verre, repose au-dessus d'un trou de la platine. Le miroir y envoie la lumière par en dessous. Juste au-dessus de la lame, l'objectif, petit et très bombé, forme dans le tube une image réelle, agrandie et renversée. L'oculaire, en haut, agit comme une loupe sur cette image. Sur la planche, une lentille de champ placée sous la lentille d'œil élargit la zone visible d'un coup.

Les deux grossissements se multiplient. Un objectif qui grossit dix fois et un oculaire qui grossit dix fois donnent cent fois en tout. En montant ou en descendant le tube, on met la préparation au point ; aux forts grossissements, la profondeur nette ne fait que quelques millièmes de millimètre.

Grossir davantage ne fait pas toujours voir davantage. Les premières lentilles déviaient chaque couleur un peu différemment et bordaient l'image de franges colorées. Joseph Jackson Lister a largement réglé ce défaut vers 1830 avec des objectifs associant deux sortes de verre. Plus tard dans le siècle, Ernst Abbe, qui travaillait avec la maison Zeiss à Iéna, a montré que la nature ondulatoire de la lumière impose elle-même une limite : un microscope optique classique ne sépare pas deux points distants de beaucoup moins de 0,2 µm environ, à peu près la moitié de la longueur d'onde de la lumière visible ; la valeur exacte dépend de la couleur de la lumière et de l'ouverture de l'objectif. Pour voir plus petit, il faut le microscope électronique ou des méthodes de fluorescence particulières.

L'instrument de Leeuwenhoek vu de côté : la longue vis lève ou abaisse la pointe porte-objet, la courte la rapproche ou l'éloigne de la lentille.

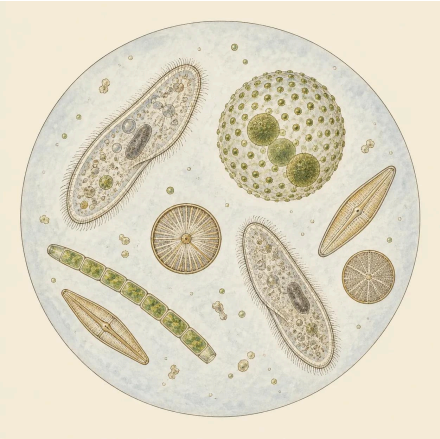
Comment le fabriquer

Un microscope à une lentille du type de Leeuwenhoek est à la portée d'un amateur soigneux et peut grossir cent fois ou davantage.

Faire la lentille. Le plus simple est une bille de verre ou de saphir de 2 à 3 mm, vendue pour l'optique ou pour les coupleurs de fibre. Une bille de verre ordinaire de 2 mm a une distance focale d'environ 1,5 mm, mesurée depuis son centre, et grossit à peu près 150 fois. La préparation doit se trouver à un demi-millimètre seulement de la surface du verre. Leeuwenhoek fabriquait aussi des lentilles en fondant du verre ; chauffer le bout d'une fine baguette de verre jusqu'à ce qu'une perle ronde se forme fonctionne, mais cela demande une flamme de gaz et mieux vaut le laisser à des gens formés au travail du verre au chalumeau.

La monter. Percer, dans deux minces lames de laiton ou d'aluminium d'environ 5 × 2,5 cm, un trou d'environ la moitié du diamètre de la bille : il sert de diaphragme et masque le bord flou de la lentille. Chanfreiner chaque trou côté intérieur pour que la bille s'y loge, prendre la lentille en sandwich entre les lames et les riveter ou les boulonner près des bords. Ébavurer soigneusement et arrondir les angles.

Ajouter le porte-objet. Fixer derrière la plaque un petit bloc monté sur une longue vis qui traverse une équerre, de sorte qu'en tournant la vis on le monte ou le descend. Fixer au bloc une pointe, ou une lamelle couvre-objet aux bords finis, qui tient la préparation juste derrière la lentille, et une seconde vis qui traverse le bloc et appuie sur la plaque, pour régler la distance. Choisir des pas de vis fins : il faut amener la préparation à moins d'un demi-millimètre de la lentille et la déplacer au centième de millimètre.



Une goutte d'eau de mare vue à une centaine de fois : paramécies, colonie de Volvox, diatomées et algue verte.

S'en servir. Approcher la lentille tout près de l'œil sans le toucher, la préparation de l'autre côté, et regarder vers une lumière vive et diffuse, un mur blanc ou un ciel couvert. Une goutte d'eau de mare sur une lamelle montre des protozoaires et des algues en mouvement.

> **Sécurité.** Ne dirigez jamais un microscope ni son miroir vers le Soleil : la lumière solaire concentrée peut abîmer l'œil de façon irréversible en un instant. Le verre chaud ressemble au verre froid : laissez refroidir perles et baguettes sur un support résistant à la chaleur, et tenez les flammes loin de tout ce qui brûle. Portez des lunettes de protection pour percer le métal. L'eau de mare n'est pas propre : lavez-vous les mains après l'avoir manipulée.

Histoire et évolution

Des lunetiers des Pays-Bas ont été les premiers à placer deux lentilles dans un tube, entre 1590 et 1620 environ. Des récits plus tardifs en ont fait honneur à Zacharias Janssen, de Middelbourg, mais ils reposent surtout sur des déclarations de son fils faites des décennies après ; Cornelis Drebbel et d'autres ont construit des instruments semblables. En 1624, Galilée envoya l'un de ses « occhialini » à Federico Cesi, et l'année suivante Johannes Faber, membre de l'Accademia dei Lincei fondée par Cesi, proposa de l'appeler microscope.

La Micrographia de Robert Hooke, publiée par la Royal Society en 1665, rendit le microscope composé célèbre. Ses trente-huit gravures montraient une puce, un pou et une fine tranche de liège, dont Hooke appela les compartiments vides des cellules. À Delft, le drapier Antoni van Leeuwenhoek vit des détails plus fins avec une seule lentille. Il construisit plusieurs centaines de petits microscopes, dont certains grossissaient plus de 250 fois, et à partir de 1673 il envoya à la Royal Society des lettres décrivant des globules du sang, des spermatozoïdes et des foules de « petits animaux ». Dans une lettre de 1676 sur de l'eau où avait macéré du poivre, il décrivit des organismes que l'on sait aujourd'hui être des bactéries, les premières jamais vues ; en 1683, il en trouva de semblables dans le tartre de ses dents.

Le microscope de Hooke, dans les années 1660 : un globe rempli d'eau concentre la lumière d'une lampe à huile sur l'objet observé.

Le microscope composé n'a vraiment supplanté la lentille simple qu'au XIXe siècle, quand les objectifs achromatiques de Lister et la théorie d'Abbe en ont fait un instrument de laboratoire précis. Les microscopes électroniques, construits à partir des années 1930, voient bien en deçà de la limite de la lumière, et depuis les années 1990 certaines méthodes de fluorescence permettent aux microscopes optiques de la dépasser.

Chiffres clés

Premiers microscopes composés
Pays-Bas, vers 1590-1620 ; l'inventeur est discuté

Le nom
Proposé en 1625 par Johannes Faber, de l'Accademia dei Lincei

Meilleures lentilles de Leeuwenhoek
D'environ 70 à plus de 250 fois, pour une résolution proche de 1 µm

Micrographia de Hooke
1665, 38 planches gravées ; premier emploi de « cellule » en biologie

Limite du microscope optique classique
Environ 0,2 µm, la moitié de la longueur d'onde de la lumière visible

Sources

1. Museum of Microscopy: The Leeuwenhoek Microscope · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/leeuwenhoek.html
2. Culpeper microscope with boxfoot made by George Adams in 1738 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co119233
3. Johannes Faber (biography) · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/biography/JohannesFaber.html
4. Galileo and the microscope: timeline (estoria04) · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/microscopio/dswmedia/storia/pdf/estoria04.pdf
5. Fleas, mould and plant cells: under a 17th-century microscope · British Library https://www.bl.uk/stories/blogs/posts/fleas-mould-and-plant-cells-under-a-17th-century-microscope
6. History of the achromatic and aplanatic microscope · Antique Microscopes (Brian Stevenson) https://www.microscope-antiques.com/hxachromatic.html
7. De microscoop van Antoni van Leeuwenhoek · Koninklijke Nederlandse Vereniging voor Microbiologie https://www.knvm.org/outreach/mijlpalen-in-de-microbiologie/de-microscoop-van-antoni-van-leeuwenhoek
8. Robert Hooke (Museum of Microscopy) · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/hooke.html
9. Hooke's Microscope · Lens on Leeuwenhoek https://lensonleeuwenhoek.net/node/7761
10. Museum of Microscopy: Culpeper microscope · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/culpeper.html
11. Culpeper tripod microscope · The Golub Collection, University of California, Berkeley https://golubcollection.berkeley.edu/thumb181
12. Descriptive Catalogue of the Collection of Microscopes in charge of the Utrecht University Museum (P. H. van Cittert, 1934) · Utrecht University Library https://objects.library.uu.nl/download/1874-307223/fulltext
13. University Physics Volume 3, 2.8 Microscopes and Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-8-microscopes-and-telescopes
14. Resolution · Nikon MicroscopyU https://www.microscopyu.com/microscopy-basics/resolution

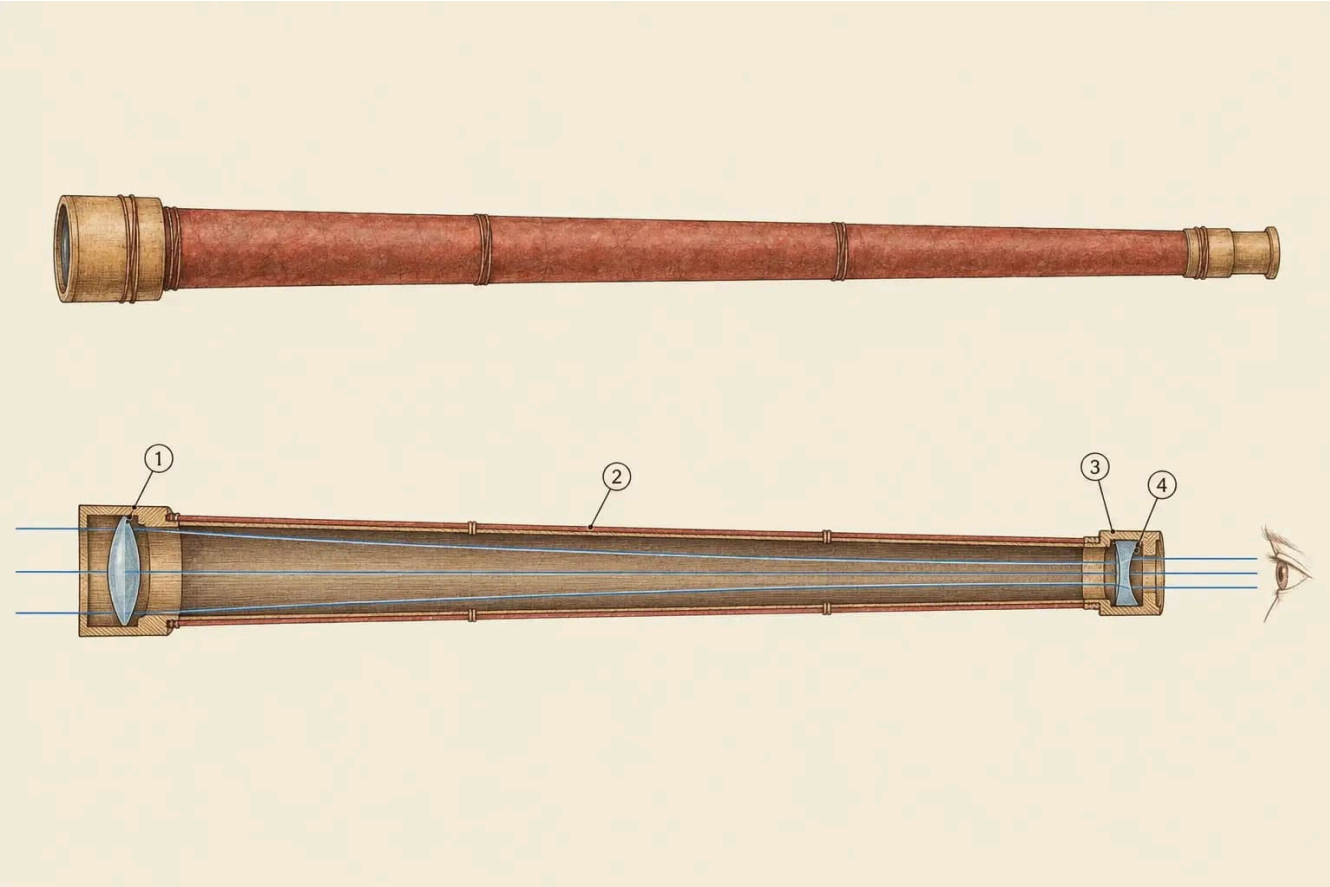
Faits vérifiés le 2026-10-12

Lunette astronomique

Rapprocher le lointain

1608 · Renaissance · Science & industrie

Nécessite: Lunettes de vue (p. 199)



1 Objectif convergent 2 Tube principal 3 Logement de l'oculaire 4 Oculaire divergent

Une lunette ou un télescope recueille la lumière d'un objet lointain avec une lentille ou un miroir et agrandit l'image qu'il en forme. Des lunetiers des Pays-Bas firent les premières lunettes en 1608, et les instruments améliorés de Galilée montrèrent des montagnes sur la Lune à la fin de 1609, puis quatre satellites tournant autour de Jupiter en janvier 1610.

Ce que c’est

Une lunette ou un télescope fait paraître les choses lointaines plus proches. Son élément principal, l’objectif, recueille bien plus de lumière que la pupille et forme une image de l’objet éloigné; un oculaire plus petit agrandit ensuite cette image pour l’œil. Dans une lunette, l’objectif est une lentille à l’avant du tube; dans un télescope, c’est un miroir courbe au fond.

L’instrument de la planche est l’une des deux lunettes de Galilée parvenues jusqu’à nous, conservée au Museo Galileo de Florence. Son tube principal est fait de deux demi-tubes de bois tenus par du fil de cuivre et recouverts de papier. Un court logement à l’avant porte l’objectif, une lentille convexe de 51 mm de diamètre et de 1 330 mm

de focale ; un autre, à l'arrière, l'oculaire, une petite lentille concave. L'instrument grossit 14 fois et ne montre qu'un champ d'un quart de degré, environ la moitié du diamètre de la pleine Lune.

Comment ça marche

La lumière d'une étoile ou d'un clocher lointain arrive en faisceau presque parallèle. L'objectif convexe dévie ce faisceau pour le faire converger vers un point, le foyer, situé à 1 330 mm derrière la lentille dans la lunette de Galilée. À lui seul, l'objectif y formerait une petite image renversée.

Dans la lunette de Galilée, l'oculaire concave intercepte la lumière avant qu'elle n'atteigne le foyer. Il écarte les rayons juste assez pour les rendre de nouveau parallèles, mais ils voyagent désormais sous des angles plus grands qu'à l'arrivée : l'œil voit l'objet plus gros, et à l'endroit. Le grossissement est le rapport de la focale de l'objectif à celle de l'oculaire, sans tenir compte du signe moins de ce dernier : 1 330 mm divisés par 94 mm donnent environ 14.

Le télescope de Newton remplaçait l'objectif par un miroir métallique courbe au fond d'un tube court ; un petit miroir plan renvoie la lumière sur le côté.

En 1611, Johannes Kepler proposa un oculaire convexe. La lunette de Kepler donne une image renversée, ce qui ne gêne pas un astronome, et un champ beaucoup plus large ; elle devint la lunette astronomique ordinaire. Une lentille dévie aussi chaque couleur un peu différemment, ce qui entoure les objets brillants de franges colorées. Isaac Newton évita ce défaut en recueillant la lumière avec un miroir concave, qui réfléchit toutes les couleurs de la même façon.

Comment la fabriquer

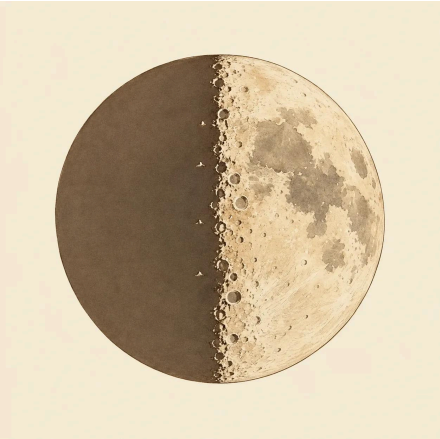
Une lunette de Galilée comme celle de la planche demande deux lentilles et un tube d'environ un mètre.

Choisir les lentilles. Pour l'objectif, une lentille convergente d'environ +1 dioptrie (1 000 mm de focale) et de 40 à 50 mm de diamètre ; une lentille simple fonctionne, un doublet achromatique acheté chez un fournisseur d'optique donne une image plus nette. Pour l'oculaire, une lentille divergente d'environ −10 dioptries (−100 mm de focale) et de 20 à 25 mm de diamètre. Ce couple grossit 1 000 ÷ 100 = 10 fois.

Faire le tube. Les lentilles doivent être à environ 900 mm l'une de l'autre : la focale de l'objectif moins celle de l'oculaire, comptée sans son signe moins. Prendre deux tubes de carton ou de plastique qui coulissent l'un dans l'autre, pour régler la longueur de quelques centimètres. Peindre ou garnir l'intérieur en noir mat pour supprimer les reflets parasites.

Monter les lentilles. Tenir l'objectif à l'extrémité avant entre deux bagues de carton ou de bois, bien perpendiculaire au tube. Placer l'oculaire dans un court bouchon à l'arrière, côté creux vers l'œil.

Mettre au point et observer. Appuyer le tube sur un support stable, un trépied photo ou une barrière, et faire coulisser les tubes jusqu'à ce qu'une cheminée lointaine paraisse nette. La nuit, la lunette montre les cratères de la Lune et, par un soir calme, les quatre plus grands satellites de Jupiter.



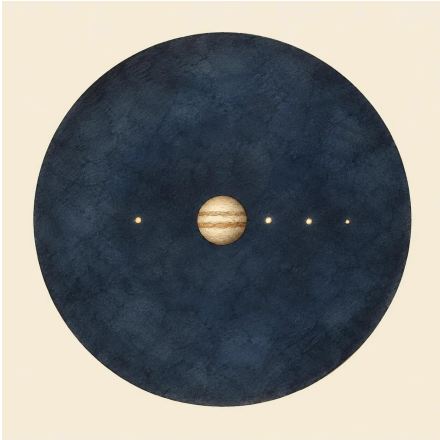
Au premier quartier, des sommets éclairés au-delà de la ligne d'ombre ont montré à Galilée que la Lune avait des montagnes.

> **Sécurité.** Ne pointez jamais une lunette ni aucune lentille vers le Soleil, même un instant ou au coucher, et ne laissez jamais un enfant pouvoir le faire : la lumière solaire concentrée peut abîmer l'œil immédiatement et de façon irréversible, et mettre le feu au tube. Observer le Soleil à travers un instrument exige un filtre conçu pour cet usage, couvrant toute l'ouverture avant, solidement fixé, vérifié à chaque fois (ni rayure ni trou) et employé selon les instructions du fabricant. Les lunettes d'éclipse et les filtres vissés sur l'oculaire ne protègent pas derrière une lunette.

Histoire et évolution

Le 2 octobre 1608, Hans Lipperhey, lunetier à Middelbourg, demanda aux États généraux, à La Haye, un brevet pour un instrument permettant de voir les choses lointaines comme si elles étaient proches. Jacob Metius, d'Alkmaar, déposa une demande semblable quelques semaines plus tard, d'autres revendiquèrent aussi l'idée, et le brevet fut refusé. Aucune lunette de ces premiers fabricants n'a survécu ; celle de Lipperhey grossissait sans doute environ trois fois.

La nouvelle de la « lunette hollandaise » se répandit vite. En Angleterre, Thomas Harriot se servait d'un instrument grossissant six fois dès l'été 1609, et à Padoue Galilée, qui taillait ses propres verres, construisit une longue-vue grossissant trois fois à l'été 1609 et en présenta une de huit fois au Sénat de Venise en août. À l'automne, il atteignait une vingtaine ; les sources divergent sur l'instrument, celui-là ou un plus faible, avec lequel il étudia d'abord la Lune. Sa seconde lunette conservée grossit 21 fois. En mars 1610, son petit livre Sidereus Nuncius décrivait les montagnes de la Lune, les innombrables étoiles de la Voie lactée et quatre satellites en orbite autour de Jupiter. Le nom de telescopio fut proposé en 1611 par le prince Federico Cesi, fondateur de l'Accademia dei Lincei.



Jupiter et ses quatre grands satellites sont presque sur une même ligne ; en janvier 1610, Galilée les vit changer de place d'une nuit à l'autre.

Les astronomes construisirent ensuite des lunettes toujours plus longues pour réduire le flou coloré. Chester Moore Hall fabriqua vers 1733 des objectifs achromatiques faits de deux sortes de verre, qui ne se répandirent qu'après que John Dollond se mit à en produire à la fin des années 1750. Le télescope de Newton, conçu en 1668 et présenté dans une seconde version à la Royal Society au tournant de 1672, servit de modèle aux télescopes à miroir que William Herschel construisait lui-même ; avec l'un d'eux, il découvrit la planète Uranus en 1781.

Chiffres clés

Premier document écrit
Demande de brevet de Hans Lipperhey, La Haye, 2 octobre 1608

L'instrument de Lipperhey
Grossissement probable d'environ 3

La lunette de Galilée à Florence
Objectif de 51 mm, focale de 1 330 mm, grossissement 14

Sidereus Nuncius
Publié à Venise en mars 1610

Télescope de Newton
Conçu en 1668 ; seconde version présentée à la Royal Society en 1671-1672

Sources

1. Galileo's telescope (inv. 2427) · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/object/GalileosTelescope.html
2. Instruments: Galileo's telescopes · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/pencil/eng/html/Tools/01%20Cannocchiale.htm
3. Scientist of the Day: Hans Lipperhey · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/hans-lipperhey/
4. Galileo's telescope: reflecting telescopes · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/dswmedia/storia/estoria6_st.html
5. History of the achromatic and aplanatic microscope (Hall and Dollond) · Antique Microscopes (Brian Stevenson) https://www.microscope-antiques.com/hxachromatic.html
6. Telescope · The Galileo Project, Rice University https://galileo.library.rice.edu/sci/instruments/telescope.html
7. 7-foot Newtonian (reflector) telescope · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-11122
8. Galileo's telescope (inv. 2427): measurements of the lenses · Museo Galileo (IMSS) https://imss.fi.it/news/cielimedicei/01/estrumento2.html
9. Galileo's knowledge of optics and the functioning of the telescope, revised (Y. Zik and G. Hon) · arXiv https://arxiv.org/abs/1307.4963
10. Learning from Galileo's errors (E. Bernieri) · arXiv https://arxiv.org/abs/1206.4244
11. Telescopes of Galileo (V. Greco, G. Molesini and F. Quercioli), Applied Optics 32, 6219–6226 · Optica Publishing Group https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-32-31-6219
12. University Physics Volume 3, 2.8 Microscopes and Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-8-microscopes-and-telescopes
13. University Physics Volume 3, 4.5 Circular Apertures and Resolution · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/4-5-circular-apertures-and-resolution
14. Astronomy 2e, 6.1 Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/astronomy-2e/pages/6-1-telescopes

Faits vérifiés le 2026-10-12

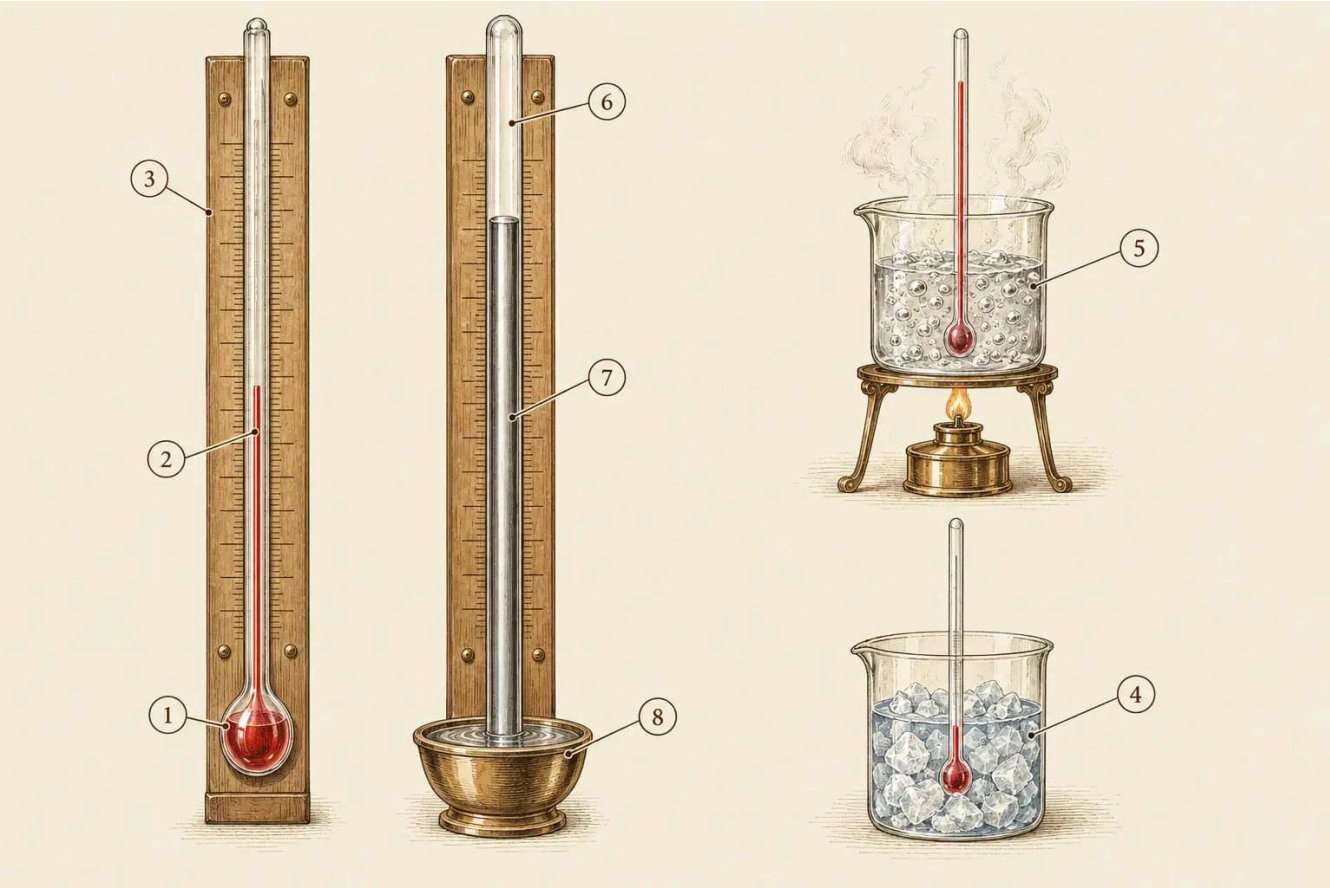
Thermomètre et baromètre

Température et pression lues sur le verre

v. 1654 · Renaissance · Science & industrie

Nécessite : Verre (p. 134), Mesures et étalons (p. 129), Numération de position (p. 99)

Mène à : Réfrigération (p. 284)



1 Réservoir de liquide 2 Tige de verre fine 3 Échelle graduée 4 Glace fondante, point fixe bas (0 °C) 5 Eau bouillante, point fixe haut (100 °C à 1 013,25 hPa) 6 Espace vide en haut du tube fermé 7 Colonne de mercure, environ 760 mm 8 Cuvette ouverte

Un thermomètre montre la température par la longueur d'un filet de liquide dans un fin tube de verre, lue sur une échelle fixée par la glace fondante et l'eau bouillante. Son compagnon, le baromètre, pèse l'air par la hauteur de la colonne de liquide que l'atmosphère peut soutenir : environ 760 mm de mercure au niveau de la mer.

Ce que c’est

Un thermomètre change la température en une longueur qu’on peut lire. Un réservoir de verre plein de liquide se prolonge par un tube au canal très étroit. Quand le liquide se réchauffe, il se dilate et son filet monte le long d’une échelle.

Le baromètre est sorti des mêmes ateliers italiens et pèse l’air au-dessus de nous par la hauteur d’une colonne de liquide. Avec des thermomètres construits à l’identique, des observateurs de villes différentes ont pu comparer

leurs relevés, comme le fit le premier réseau météorologique à partir de 1654.

Comment ça marche

Les liquides gonflent un peu quand on les chauffe : l'éthanol d'environ 0,11 % de son volume par degré, le mercure d'environ 0,018 %, le verre beaucoup moins. Le canal rend ce gain visible, puisque tout le volume en trop du réservoir doit s'y loger. Un réservoir contenant un cinquième de centimètre cube d'alcool gagne environ 0,2 mm^3 par degré ; dans un canal de 0,2 mm de diamètre, cela fait un pas d'environ 7 mm.

Une échelle demande des repères que chacun peut reproduire. La glace pure fond toujours à la même température, et l'eau pure bout toujours à la même température sous la même pression d'air. L'échelle Celsius les appelle 0 et 100 et met cent pas égaux entre les deux. En altitude, l'eau bout à une température plus basse, à peu près un degré de moins tous les 300 m. Étalonner un instrument, c'est le comparer à ces points ou à une référence sûre et noter l'écart ; sans cela, deux thermomètres peuvent différer de plusieurs degrés. En cuisine aussi : l'agence britannique de sécurité des aliments demande 70 °C tenus deux minutes au cœur d'un plat cuit.

L'eau seule se contracte en se réchauffant entre 0 et 4 °C, et gèle à 0 °C. Les premiers thermomètres scellés contenaient de l'alcool, et à partir du XVIIIe siècle les instruments de précision surtout du mercure, qui reste liquide sur un large intervalle et ne mouille pas le verre.

Le baromètre de Torricelli était un tube de verre d'environ un mètre, fermé à un bout, rempli de mercure et retourné dans une cuvette de mercure. La colonne descendait jusqu'à ce qu'il en reste environ 760 mm au-dessus de la cuvette, avec un espace presque vide en haut. Son poids équilibre la poussée de l'air sur la surface libre. Le mercure est 13,6 fois plus dense que l'eau : un baromètre à eau demande plus de 10 m de tube, la hauteur même qui limite une pompe aspirante.

Près du niveau de la mer, la colonne baisse d'environ un millimètre tous les 11 m de montée, si bien qu'un baromètre mesure aussi l'altitude. Un baromètre qui baisse annonce souvent du vent et de la pluie, un baromètre qui monte du beau temps. Les baromètres anéroïdes remplacent le liquide par une capsule métallique scellée qui se déforme.

Comment le fabriquer

Le thermomètre à liquide est un instrument d'apprentissage : comparez-le à une référence pour connaître son erreur, et ne vous en servez jamais pour un aliment ni pour vérifier une fièvre. Le baromètre à bocal indique seulement si la pression monte ou baisse.

Le thermomètre à liquide. Prenez un petit flacon de verre d'environ 100 ml, une paille transparente d'au moins 25 cm et de la pâte à modeler. Mélangez à volumes égaux de l'eau et de l'alcool isopropylique à 70 %, teinté de colorant alimentaire : le mélange se dilate plus que l'eau et évite son comportement bizarre près du gel. Remplissez le flacon à ras bord, enfoncez bien la paille dans le liquide et scellez le goulot à la pâte, sans bulle d'air. À température ambiante, le liquide doit monter d'environ 8 cm au-dessus de la pâte ; ajoutez-en ou retirez-en un peu par la paille avec un compte-gouttes. Plus le flacon est grand et la paille fine, plus le pas par degré est grand. Collez une bande de papier derrière la paille.

Le point fixe bas : le flacon reste dans la glace fondante jusqu'à ce que le filet s'arrête.

Fixez les points. Posez le flacon dans un bol de glace pilée et d'un peu d'eau, assez profond pour le couvrir jusqu'au goulot. Remuez, attendez que le filet ne bouge plus, ce qui peut prendre un quart d'heure, et marquez 0 ; le liquide doit rester visible au-dessus de la pâte. Laissez-le revenir à température ambiante, puis placez-le à côté d'un thermomètre de cuisine numérique dans un bol d'eau tiède du robinet à environ 40 °C, remuez, attendez que les deux lectures se stabilisent et marquez la valeur de la référence ; le filet ne doit pas atteindre le haut. Si l'un des deux essais échoue, changez la quantité de liquide ou le flacon et reprenez les deux points. Divisez l'intervalle en pas égaux, puis comparez avec la référence à température ambiante pour connaître votre erreur. Ne pressez jamais le flacon.

Un baromètre à bocal : la membrane s'enfonce quand la pression monte, et la pointe de la paille se lève.

Le baromètre à bocal. Coupez le col d'un ballon de baudruche, tendez-le bien sur un bocal de verre à large ouverture et liez-le d'une ficelle pour que l'air ne passe pas. Collez un bout d'une longue paille au centre de la membrane et laissez l'autre dépasser du bord, devant une carte. Quand la pression extérieure monte, la membrane s'enfonce et la pointe se lève. L'air enfermé se dilate aussi à la chaleur : un degré déplace l'aiguille à peu près autant que 3,5 hPa de pression. Gardez le bocal à l'abri du soleil, dans une pièce dont la température varie peu, et comparez ses mouvements avec la tendance de pression donnée par le service météo.

La lecture. Gardez l'œil à la hauteur du haut du filet.

> **Sécurité.** Ne fabriquez jamais d'instrument au mercure : sa vapeur est toxique. Si un vieux thermomètre au mercure se casse, faites sortir personnes et animaux et tenez-les dehors, ouvrez les fenêtres sur l'extérieur et fermez les portes vers le reste du logement. N'utilisez ni aspirateur ni balai. Sur un sol dur, avec des gants, rassemblez les billes avec un carton rigide, posez-les sur un essuie-tout humide, ramassez les plus fines avec du ruban adhésif et enfermez le tout dans un sac étiqueté. Sur un tapis ou un tissu d'ameublement, découpez ou mettez de côté la partie souillée et demandez conseil au service local de santé ou d'environnement. Une fois le nettoyage fini, aérez la pièce au moins 24 heures et apportez les déchets à une collecte de déchets dangereux selon les consignes locales. L'alcool isopropylique est inflammable et toxique : tenez-le loin des flammes et des enfants. Utilisez de l'eau chaude du robinet, jamais bouillante, et ne passez jamais un verre directement de la glace à l'eau chaude.

Histoire et évolution

Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie savaient que l'air chauffé gonfle et pousse l'eau dans un tube. Benedetto Castelli se souvenait d'avoir vu Galilée présenter un tel thermoscope vers 1600, et en 1612 le médecin Santorio, à Venise, l'avait doté d'une échelle pour suivre les fièvres. Ouvert, il réagissait aussi à la pression de l'air.

Torricelli décrivit le baromètre à mercure dans une lettre de juin 1644. En 1648, Florin Périer, beau-frère de Pascal, en monta un au sommet du puy de Dôme, où la colonne était environ 8,5 cm plus basse qu'à Clermont. À Florence, les artisans du grand-duc Ferdinand II enfermèrent l'alcool dans un verre scellé et, en 1654, le grand-duc envoya des thermomètres identiques au premier réseau météorologique.

Le thermoscope de Galilée : quand l'air de la fiole refroidit, l'eau monte dans le col.

Daniel Gabriel Fahrenheit fabriqua des thermomètres à mercure à Amsterdam dès les années 1710 et publia sa méthode en 1724. Anders Celsius proposa son échelle en 1742, avec 0 à l'ébullition et 100 au gel ; elle fut retournée peu après sa mort, en 1744. En 1848, William Thomson, futur lord Kelvin, proposa une échelle absolue, dont le zéro est aujourd'hui fixé à −273,15 °C.

En 1868, Carl Wunderlich, à partir d'environ 25 000 malades, plaça la normale vers 37 °C et le début de la fièvre vers 38 °C. Robert FitzRoy lança les avis de tempête britanniques en 1861 et publia la première prévision publique dans le Times en août de la même année. Les capteurs numériques et les thermomètres à d'autres liquides ont depuis largement remplacé les thermomètres au mercure, aujourd'hui restreints dans de nombreux pays.

Chiffres clés

Points fixes (Celsius)
0 °C pour la glace fondante, 100 °C pour l'eau qui bout à 1 013,25 hPa

Dilatation par degré
Éthanol environ 0,11 % de son volume, mercure environ 0,018 %

Température du corps (Wunderlich, 1868)
Environ 37 °C en moyenne ; 38 °C « probablement fébrile » ; données de quelque 25 000 malades

Pression de l'air au niveau de la mer
Environ 760 mm de mercure, soit environ 10,3 m d'eau

Premier réseau météorologique
1654, créé par Ferdinand II de Toscane avec des thermomètres à alcool scellés

Sources

1. Letter by Castelli on the invention of the thermoscope · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/indepth/LetterByCastelliOnInventionThermoscope.html
2. Medici meteorological network · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/multimedia/MediciMeteorologicalNetworkBis.html
3. Fifty-degree thermometer · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/FiftydegreeThermometer.html
4. Thermometers of the Accademia del Cimento · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/section/ThermometersAccademiaCimentoArtScienceGlassware.html
5. Torricellian experiment · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/indepth/TorricellianExperiment.html
6. This Month in Physics History: Torricelli demonstrates the existence of a vacuum · APS News, American Physical Society https://www.aps.org/apsnews/2012/10/torricelli-demonstrates-existence-vacuum
7. Blaise Pascal (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/blaise-pascal/
8. On September 19, 1648, Pascal conducted an experiment that proved the existence of atmospheric pressure · Scientific Russia https://en.scientificrussia.ru/articles/under-atmospheric-pressure
9. Fahrenheit, Daniel Gabriel (ADB and NDB entries) · Deutsche Biographie, Bavarian Academy of Sciences https://www.deutsche-biographie.de/sfz14129.html
10. Daniel Gabriel Fahrenheit · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/biography/DanielGabrielFahrenheit.html
11. The Legacy of Anders Celsius · JSTOR Daily https://daily.jstor.org/the-legacy-of-anders-celsius/
12. Kelvin: History · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin/kelvin-history
13. Wunderlich, Das Verhalten der Eigenwärme in Krankheiten (1868) · HistoryofMedicine.com (Jeremy Norman) https://archive.historyofmedicine.com/id/3542
14. Thermometry and the role of fever in medicine · Healio https://www.healio.com/news/hematology-oncology/20120325/thermometry-and-the-role-of-fever-in-medicine
15. Robert FitzRoy and the early Met Office · Met Office https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/robert-fitzroy
16. Air pressure · NOAA JetStream https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/air-pressure
17. Learning lesson: the "dry" barometer · NOAA JetStream https://www.noaa.gov/jetstream/ll-pressure2
18. Cubical expansion coefficients of liquids · The Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/cubical-expansion-coefficients-d_1262.html
19. Calibrating your food thermometer · Texas A&M AgriLife Extension https://agrilifeextension.tamu.edu/calibrating-your-food-thermometer
20. High-altitude cooking (Guide E-215) · New Mexico State University Cooperative Extension https://pubs.nmsu.edu/_e/E215/
21. Cooking your food · Food Standards Agency https://www.gov.uk/government/publications/cooking-your-food/cooking-your-food
22. What to do if a mercury thermometer breaks · US Environmental Protection Agency https://www.epa.gov/mercury/what-do-if-mercury-thermometer-breaks

Faits vérifiés le 2026-10-14

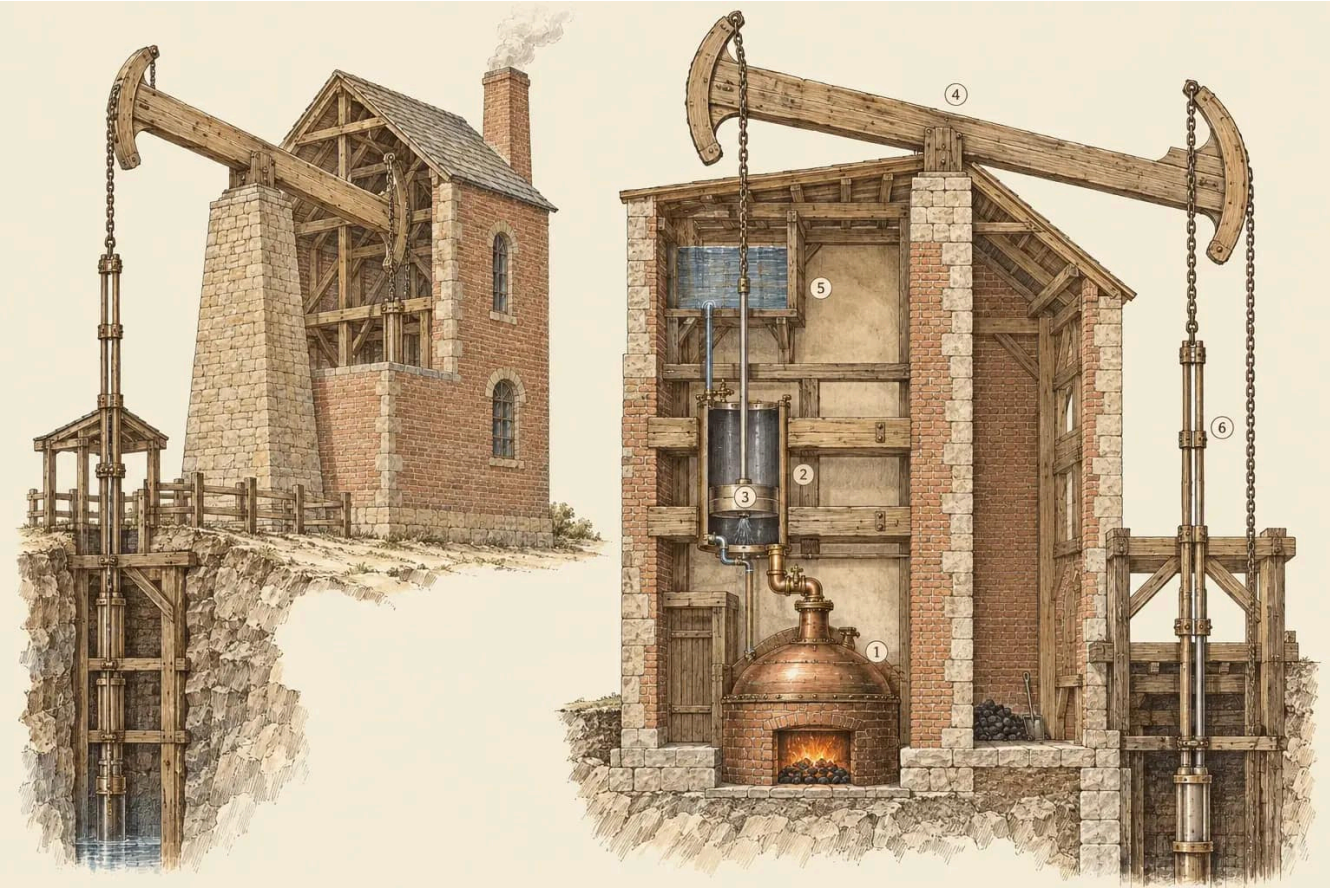
Machine à vapeur

La chaleur changée en mouvement

1712 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Métallurgie du fer (p. 138), Engrenages (p. 155), Pompe à piston (p. 163)

Mène à: Moteur à combustion interne (p. 316), Réfrigération (p. 284), Locomotive à vapeur (p. 246), Turbine à vapeur (p. 328)



1 Chaudière 2 Cylindre 3 Piston 4 Balancier 5 Réservoir d'eau d'injection 6 Tiges de pompe

Une machine à vapeur change la chaleur d'un foyer en mouvement en se servant de la vapeur pour mouvoir un piston. La machine de Thomas Newcomen, en 1712, pompait l'eau des mines, et les perfectionnements de James Watt à partir de 1765 rendirent la vapeur assez économique pour faire tourner les usines de la révolution industrielle.

Ce que c’est

Une machine à vapeur se sert de la vapeur d’eau bouillante pour pousser un piston, et transforme ainsi un combustible en travail mécanique. Les premières pompaient l’eau des mines; les suivantes ont entraîné filatures et machines, et propulsé navires et locomotives.

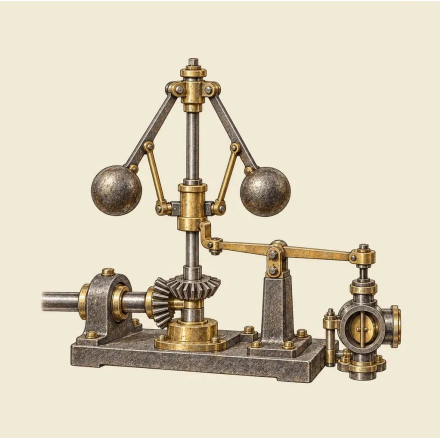
La machine de la planche est du type construit par Thomas Newcomen en 1712. On l’appelle machine atmosphérique, car le travail est fourni par la pression de l’air extérieur; la vapeur ne sert qu’à faire le vide. Sa chaudière travaille à peine au-dessus de la pression atmosphérique et risque donc beaucoup moins d’éclater que les chaudières à haute pression du XIXe siècle.

Comment ça marche

La machine s'organise autour d'un cylindre vertical, ouvert en haut, qui contient un piston. Celui-ci pend par une chaîne à une extrémité d'un grand balancier de bois, qui oscille sur le mur de la maison des machines. À l'autre extrémité pendent les tiges de pompe, qui descendent dans le puits jusqu'aux pompes du fond de la mine.

Les lourdes tiges de pompe tirent leur extrémité du balancier vers le bas, ce qui soulève le piston, et la vapeur de la chaudière placée dessous remplit le cylindre. Une soupape coupe la vapeur. Un jet d'eau froide venu du réservoir est pulvérisé dans le cylindre : la vapeur se condense aussitôt en un peu d'eau et laisse un vide partiel. L'air au-dessus du piston appuie alors plus fort que la vapeur raréfiée restée dessous. Sur un cylindre d'un demi-mètre de diamètre, cette différence de pression peut atteindre en théorie une vingtaine de kilonewtons, le poids de deux tonnes ; la force utile restait bien inférieure. Le piston descend, le balancier bascule et les tiges remontent en tirant l'eau de la mine.

L'éolipyle de Héron d'Alexandrie, au Ier siècle, tournait sous l'effet de jets de vapeur sans fournir de travail utile.



Sur les machines de Watt, plus tardives, les boules du régulateur s'écartent quand la machine accélère et referment en partie l'admission de vapeur.

Quand la vapeur revient, elle chasse l'air par une petite soupape reniflante, tandis que l'eau condensée s'écoule par un tuyau séparé muni d'un clapet. Le cycle recommence une douzaine de fois par minute. Une tige à taquets suspendue au balancier ouvre et ferme les robinets toute seule.

À chaque coup, le jet froid refroidit le cylindre, que la vapeur suivante doit réchauffer avant de pouvoir le remplir. La plus grande partie du charbon part dans ce réchauffage.

La solution de James Watt consiste à condenser la vapeur dans un récipient séparé, maintenu froid, pendant que le cylindre reste chaud. Il ferme ensuite le haut du cylindre, fait agir la vapeur des deux côtés du piston et ajoute des engrenages pour obtenir un mouvement de rotation : la machine peut alors entraîner des ateliers entiers, et plus seulement des pompes.

Comment la fabriquer

Une machine atmosphérique demande un chaudronnier, un fondeur capable de couler et d'aléser un cylindre, un charpentier pour le balancier et un maçon pour le bâtiment.

Faire la chaudière. Autrefois, c'était une enveloppe rivetée de cuivre ou de fer forgé à dessus bombé, maçonnée au-dessus d'une grille de foyer, avec une soupape de sûreté à poids, des robinets pour contrôler le niveau d'eau et un tuyau d'alimentation. Une reconstitution en état de marche exige une chaudière conçue, éprouvée et inspectée par un chaudronnier qualifié ; n'en improvisez jamais.

Couler et aléser le cylindre. Le cylindre se trouve juste au-dessus de la chaudière, porté par de fortes poutres prises dans les murs, et ne lui est relié que par un court tuyau de vapeur. Son alésage doit être rond et lisse sur toute sa longueur, sinon le piston fuit ; aléser juste fut l'un des problèmes les plus difficiles du XVIIIe siècle.

Monter le piston. Garnissez son pourtour de corde ou de cuir et maintenez dessus une mince couche d'eau pour l'étanchéité.

Dresser le balancier. Taillez-le dans le chêne, avec à chaque bout un secteur courbe pour que les chaînes tirent bien à la verticale. Posez son axe central sur un mur épais.

Installer les soupapes. L'une admet la vapeur, une autre pulvérise l'eau froide d'un réservoir placé en hauteur ; une soupape reniflante évacue l'air, et un tuyau muni d'un clapet draine l'eau condensée. Manœuvrez-les d'abord à la main, puis par des taquets fixés sur une tige pendue au balancier.

> **Sécurité.** Une chaudière dont la soupape de sûreté est bloquée, coincée ou surchargée peut exploser : n'obstruez ni n'isolez jamais la voie de décharge, et n'ajoutez jamais de poids sur la soupape. La vapeur et l'eau chaude brûlent gravement. Tenez-vous loin du balancier, des chaînes et des tiges de pompe pendant la marche, et clôturez le puits.

Histoire et évolution

Héron d'Alexandrie décrit au Ier siècle une sphère que font tourner des jets de vapeur, mais elle reste une curiosité. En 1690, Denis Papin montre que la condensation de la vapeur sous un piston peut soulever un poids. Thomas Savery fait breveter en 1698 une pompe sans piston : elle aspire l'eau en condensant de la vapeur dans un récipient, puis la refoule plus haut par la pression de la vapeur, mais ne convient qu'à des hauteurs modestes.

Newcomen, quincaillier de Dartmouth, et son associé John Calley installent la première machine en service en 1712, dans une houillère près du château de Dudley. Comme le brevet de Savery couvre l'élévation de l'eau par le feu, les machines de Newcomen sont construites sous ce brevet jusqu'à son expiration en 1733. À la mort de Newcomen, en 1729, plus d'une centaine fonctionnent en Grande-Bretagne et en Europe.

L'engrenage « soleil et planète » de Watt, en 1781, transforme le va-et-vient du balancier en rotation.

En 1763, James Watt, fabricant d'instruments à l'université de Glasgow, doit réparer un modèle réduit de machine Newcomen. Deux ans plus tard, il a l'idée du condenseur séparé, qu'il fait breveter en 1769. Avec Matthew Boulton, il commence à vendre des machines en 1776. Elles consomment environ quatre fois moins de combustible qu'une machine Newcomen de même puissance. Vers 1800, alors que le brevet de Watt expire, Richard Trevithick et d'autres se tournent vers la vapeur à haute pression pour construire des machines plus petites et plus légères, qui gagnent bientôt les rails et les navires.

Chiffres clés

Première machine en service
1712, houillère de Conygree, près de Dudley (Angleterre)

Cadence
Environ 12 coups par minute

Condenseur séparé de Watt
Imaginé en 1765, breveté en 1769, environ 75 % de combustible en moins

Pression dans une chaudière Newcomen
0,07 à 0,14 bar environ au-dessus de la pression atmosphérique

Machines Newcomen construites jusqu'en 1729
Plus de 100

Sources

1. Newcomen atmospheric engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_atmospheric_engine
2. Watt steam engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Watt_steam_engine
3. Newcomen atmospheric engine (object 1920-124) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50900/newcomen-atmospheric-engine-atmospheric-steam-engine
4. ASME Landmark: Newcomen Engine · Engineering and Technology History Wiki (ASME) https://ethw.org/ASME-Landmark:Newcomen_Engine
5. A new age · Science Museum https://blog.sciencemuseum.org.uk/a-new-age/

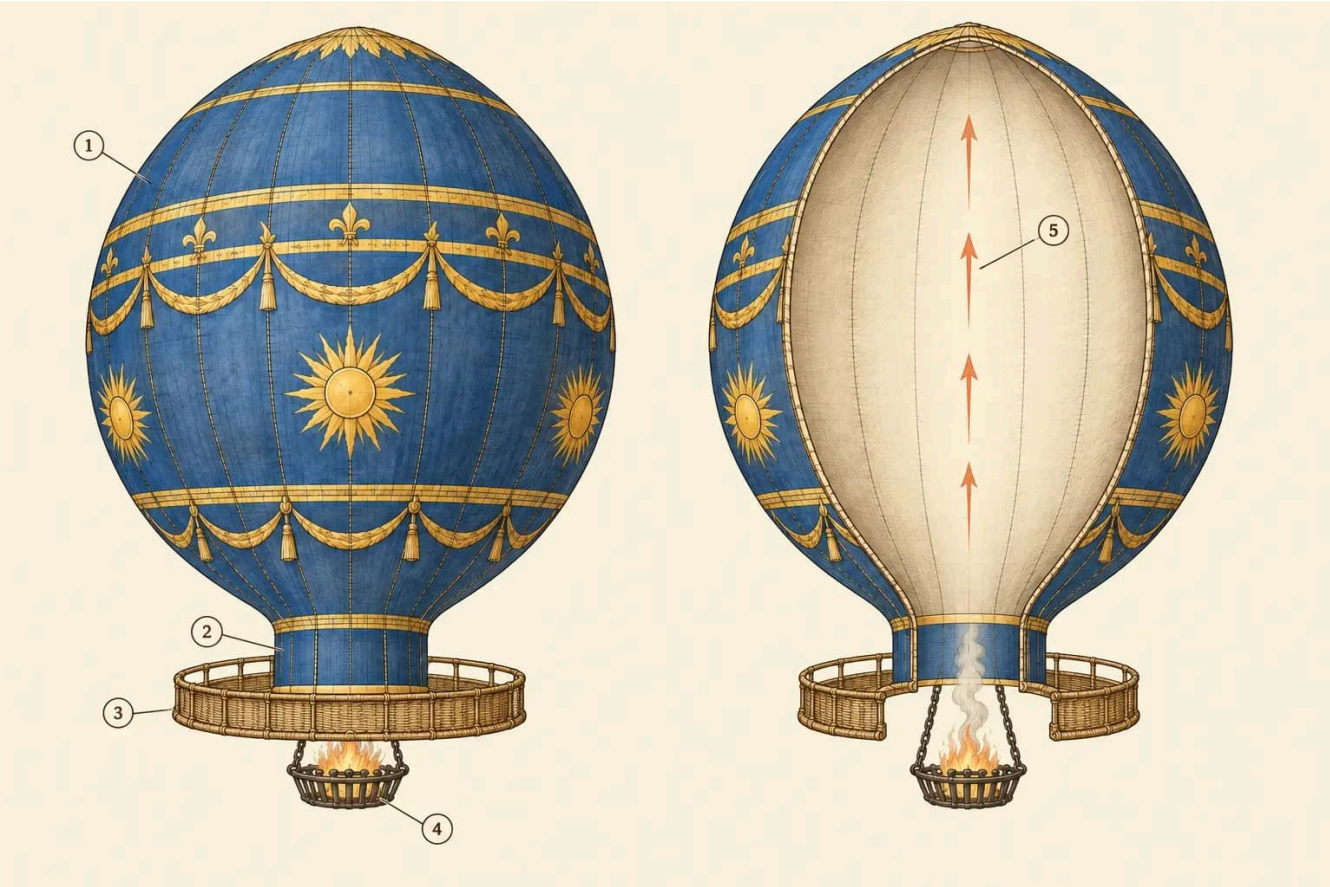
Faits vérifiés le 2026-10-11

Montgolfière

S'élever sur l'air chaud

1783 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Papier (p. 172), Maîtrise du feu (p. 9), Tissage (p. 44)



1 Enveloppe 2 Goulot ouvert 3 Galerie d'osier 4 Réchaud 5 Air chaud ascendant

Une montgolfière s'élève parce que l'air chauffé dans son enveloppe est plus léger que l'air plus frais qui l'entoure. Les frères Montgolfier, qui avaient fait voler un petit modèle dans une pièce en 1782, en montrèrent une en public pour la première fois en 1783, et le 21 novembre de cette année-là leur ballon emporta deux hommes au-dessus de Paris, premier vol humain libre.

Ce que c'est

Une montgolfière est un grand sac léger, l'enveloppe, ouvert par le bas et rempli d'air chauffé. L'air chaud est moins dense que l'air froid : le sac et ce qui y est suspendu pèsent moins que l'air extérieur qu'ils déplacent, et l'ensemble s'élève. Rien ne la propulse : un ballon monte quand on chauffe l'air qu'il contient, descend quand cet air refroidit, et dérive avec le vent.

Le ballon de la planche est celui que Joseph et Étienne Montgolfier, papetiers d'Annonay, construisirent pour le premier vol libre avec des hommes à bord, le 21 novembre 1783. Les récits lui donnent un peu plus de 20 m de haut. Il était fait d'une toile, décrite comme du lin ou du taffetas, doublée de papier et enduite d'un vernis à l'alun

pour la protéger du feu, et peinte en bleu et or. Une galerie d'osier en anneau entourait le goulot ouvert et portait les deux aéronautes ; un réchaud de fer où brûlait de la paille pendait au milieu de l'ouverture.

Comment ça marche

À la pression du niveau de la mer, un mètre cube d'air à 20 °C pèse environ 1,2 kg. Chauffé à 100 °C, le même volume d'air ne pèse plus que 0,95 kg environ, parce que l'air s'est dilaté et qu'une partie s'est échappée par le goulot. Chaque mètre cube d'air chaud dans l'enveloppe donne donc environ un quart de kilo de portance, qui doit d'abord porter l'enveloppe et son équipement avant tout passager. Il faut un très grand volume pour emporter quoi que ce soit : l'enveloppe des Montgolfier de 1783 contenait plus d'un millier de mètres cubes.

L'air chaud monte dans le dôme et pousse sur la toile. La chaleur s'échappe peu à peu à travers le tissu et par le goulot : il faut réchauffer l'air sans cesse. En 1783, les aéronautes enfournaient la paille à la fourche dans le réchaud par des ouvertures de la galerie ; pour monter, ils ajoutaient du combustible, pour descendre ils laissaient le feu baisser. L'enveloppe prit feu à plusieurs reprises pendant le premier vol, et ils éteignirent les foyers avec des éponges mouillées.

Une montgolfière moderne : bouteilles de propane dans une nacelle d'osier et brûleur sous la bouche ouverte d'une enveloppe de nylon.

Une montgolfière moderne fonctionne de la même manière avec de meilleurs matériaux. L'enveloppe est en nylon ou en polyester, la nacelle en osier, et un brûleur au propane lance de brèves et puissantes flammes dans la bouche de l'enveloppe. Le pilote monte ou descend pour trouver des vents qui soufflent dans d'autres directions : c'est sa seule façon de se diriger.

Comment la fabriquer

Une maquette en papier de soie gonflée à l'air chaud d'un sèche-cheveux montre le principe sans aucune flamme. Elle doit être grande et légère, car l'air d'un sèche-cheveux n'est que modérément chaud.

Découper les fuseaux. Faire un gabarit en carton pour un fuseau : une longue feuille pointue de 2 m de long et 40 cm dans sa plus grande largeur, dont le bas est coupé droit là où il mesure 8 cm de large. Découper huit fuseaux dans le papier de soie le plus fin possible, en raccordant les feuilles à la colle en bâton si nécessaire.

Coller l'enveloppe. Coller les fuseaux bord à bord, avec un recouvrement d'environ 1 cm, de sorte que les pointes se rejoignent en haut et que les bas coupés droits forment une bouche ronde. Fermer le sommet avec une petite pastille ronde. Coller la bouche sur un anneau de fil de fer fin ou de carton léger de 20 cm de diamètre pour qu'elle reste ouverte.

La gonfler. À l'intérieur, dans une pièce fraîche et sans courant d'air, faire tenir l'enveloppe droite par le haut, bouche en bas. Souffler dans la bouche l'air d'un sèche-cheveux réglé au plus chaud, à environ 20 cm en dessous, pendant deux ou trois minutes, en le gardant en mouvement et sans obstruer sa prise d'air. Arrêter le sèche-cheveux et l'écarter avant de lâcher, pour que seul l'air chaud intérieur porte le ballon. Si le sac tire vers le haut, il monte vers le plafond et redescend en refroidissant ; sinon, l'air n'est pas assez chaud pour son poids, et un papier plus fin ou une enveloppe plus grande aideront.

Une maquette à huit fuseaux de papier : l'air chaud d'un sèche-cheveux peut l'élever si le papier est assez léger.

> **Sécurité.** Ne chauffez jamais un ballon de papier avec une bougie, un brûleur ou une flamme quelconque, et ne lâchez jamais de lanternes volantes : elles retombent encore allumées et provoquent des incendies. Gardez le sèche-cheveux à au moins 20 cm du papier, n'obstruez jamais sa prise d'air et arrêtez aussitôt si le papier brunit ou sent le roussi. Les vraies montgolfières ne sont pilotées que par des pilotes brevetés, avec du matériel certifié.

Histoire et évolution

Joseph Montgolfier fit voler un petit ballon de soie dans une pièce en novembre 1782, puis en construisit de plus grands avec son frère Étienne. Le 4 juin 1783, sur la place du marché d'Annonay, ils lâchèrent un ballon sans passager, de toile et de papier, d'environ 11 m de diamètre, qui monta très haut au-dessus de la ville et retomba à plus d'un kilomètre et demi au bout d'une dizaine de minutes.

Le 19 septembre 1783, à Versailles, devant Louis XVI et Marie-Antoinette, un ballon emporta dans un panier un mouton, un canard et un coq. Deux mois plus tard, le 21 novembre, Jean-François Pilâtre de Rozier, professeur de sciences, et le marquis d'Arlandes, officier, s'élevèrent du parc du château de la Muette, près du bois de Boulogne, à l'ouest de Paris. Ils volèrent environ 25 minutes, à 900 m d'altitude au plus, et se posèrent en terrain découvert près de l'actuelle place d'Italie, à quelque 9 km. Dix jours plus tard, Jacques Charles et Nicolas-Louis Robert s'envolèrent des Tuileries dans un ballon à hydrogène. Les ballons à gaz restaient en l'air bien plus longtemps, et l'air chaud fut ensuite peu utilisé.

Les premiers passagers, à Versailles en septembre 1783 : un mouton, un canard et un coq.

La montgolfière revint à la fin des années 1950, quand l'Américain Ed Yost associa une enveloppe en tissu synthétique à un brûleur alimenté au propane en bouteille. Son vol au départ de Bruning, dans le Nebraska, le 22 octobre 1960, est tenu pour le premier d'une montgolfière moderne, et à partir de 1961 son entreprise, Raven Industries, vendit des montgolfières de loisir.

Chiffres clés

Première ascension publique
Annonay, 4 juin 1783, sans passager

Premiers passagers
Un mouton, un canard et un coq, Versailles, 19 septembre 1783

Premier vol humain libre
21 novembre 1783, Paris : environ 25 minutes, quelque 9 km

Portance de l'air chaud
Environ 0,25 kg par mètre cube pour de l'air à 100 °C contre 20 °C, au niveau de la mer

Montgolfière moderne
Ed Yost, Bruning (Nebraska), 22 octobre 1960 : brûleur au propane

Sources

1. Model of Montgolfier balloon used in first demonstration to carry human passengers in free flight · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co29133/model-of-montgolfier-balloon-used-in-first-demonstration-to-carry-human-passengers-in-free-flight
2. Montgolfier balloon · The Museum of Flight, Seattle https://www.museumofflight.org/aircraft/montgolfier-baloon
3. Smithsonian recalls 1st manned (balloon) flight · The Christian Science Monitor https://www.csmonitor.com/1983/1205/120524.html
4. Scientist of the Day: Jacques-Alexandre Charles · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/jacques-alexandre-charles
5. How the CIA's secret balloon program led Ed Yost to invent the modern hot air balloon · Seattle Ballooning https://seattleballooning.com/how-the-cia-secret-balloon-program-led-ed-yost-to-invent-the-modern-hot-air-balloon/
6. Ed Yost · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ed_Yost
7. 21 November 1783 · This Day in Aviation https://www.thisdayinaviation.com/?p=9465
8. Montgolfier brothers (Hall of Fame) · San Diego Air & Space Museum https://sandiegoairandspace.org/hall-of-fame/honoree/montgolfier-brothers
9. Scientist of the Day: The Montgolfier Brothers · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/the-montgolfier-brothers/
10. Earth Atmosphere Model (metric units) · NASA Glenn Research Center https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html
11. Drag of a Sphere · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-of-a-sphere

Faits vérifiés le 2026-10-12

Vaccination

Apprendre au corps à l'avance

1796 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Verre (p. 134)

Mène à: Pénicilline (p. 359)

1 Vache laitière, source de la vaccine 2 Trayeuse 3 Lancette dans son étui 4 Fiole de verre 5 Plume d'oie et encrier 6 L'Inquiry de Jenner (1798)

La vaccination entraîne le système immunitaire avec une forme affaiblie, tuée ou partielle d'un microbe, pour que le corps sache ensuite repousser la vraie maladie. Edward Jenner a montré en 1796 que la vaccine protège de la variole; deux siècles plus tard, la vaccination a fait de la variole la première maladie humaine éradiquée.

Ce que c’est

La vaccination prépare le corps à une maladie infectieuse, en général avant qu’il ne la rencontre. La personne reçoit une version affaiblie, tuée ou partielle du microbe, ou bien les instructions pour fabriquer l’un de ses composants. Le système immunitaire réagit comme face à une vraie infection, avec un risque bien moindre que celui de la maladie elle-même, et il garde la mémoire de cette rencontre. Si le vrai microbe se présente plus tard, la défense démarre vite et l’arrête le plus souvent avant qu’il ne fasse de gros dégâts.

Le mot vient du latin *vacca*, la vache. Le premier vaccin utilisait la vaccine, maladie bénigne des bovins que les trayeuses attrapaient sur les mains, pour protéger de la variole, l'une des maladies les plus meurtrières de l'histoire. La planche est une composition : le décor rural de l'expérience de 1796, et à côté des objets de l'époque, une lancette dans son étui, une fiole de verre, une plume et le livre que Jenner publia en 1798.

Comment ça marche

Le système immunitaire apprend à reconnaître les microbes à leurs formes moléculaires, les antigènes. Lors d'une première rencontre, il lui faut plusieurs jours pour trouver les bonnes cellules et les multiplier. Certains globules blancs, les lymphocytes B, fabriquent des anticorps qui s'accrochent au microbe et le désignent pour la destruction. D'autres, les lymphocytes T, tuent les cellules infectées et coordonnent la riposte. Ce délai explique qu'une première infection puisse devenir grave.

Une fois l'infection passée, il reste une population de cellules mémoire, parfois pour la vie. Une deuxième rencontre avec le même antigène déclenche une réaction plus rapide et plus forte. Le vaccin offre cette première rencontre avec un risque bien plus faible que la maladie elle-même.

La vaccine protégeait de la variole parce que les deux virus sont proches parents : leurs antigènes se ressemblent assez pour que l'immunité contre l'un couvre l'autre. Les vaccins suivants ont été conçus autrement. Certains emploient un microbe vivant affaibli qui ne rend que rarement malade, méthode inaugurée par Louis Pasteur ; on ne les donne pas à tout le monde, car une personne dont les défenses sont très affaiblies peut encore tomber malade. D'autres utilisent un microbe tué, un fragment purifié ou une toxine inactivée. Les plus récents donnent aux cellules le code génétique d'une protéine inoffensive du microbe, qu'elles fabriquent pendant peu de temps.

Pour les maladies qui se transmettent d'une personne à l'autre, le microbe ne circule plus facilement quand une part suffisante de la population est immunisée et ne le transmet plus. Cette immunité collective protège aussi ceux qui ne peuvent pas recevoir un vaccin donné ou y répondent mal. La proportion nécessaire dépend de la contagiosité de la maladie, et de la façon dont le vaccin freine la transmission, et pour combien de temps. Le tétanos, qui s'attrape par la terre et non par contact humain, n'offre pas cette protection partagée.

Les vaccins sont mis au point et produits sous une réglementation médicale stricte, et administrés le plus souvent par des professionnels de santé. Comme tout médicament, ils peuvent avoir des effets indésirables, surveillés après leur autorisation.

Comment on fabrique les vaccins

Pendant la plus grande partie du XIXe siècle, le seul vaccin était celui de la variole, et la principale difficulté était de garder le virus vivant d'un patient à l'autre.

De bras à bras. Personne ne savait encore cultiver l'agent de la vaccine en laboratoire : on l'entretenait donc chez l'homme. Environ une semaine après la vaccination, une pustule se formait au point d'inoculation. Le vaccinateur l'ouvrait à la lancette et prélevait son liquide clair, la lymphe, pour vacciner la personne suivante. Pour envoyer le vaccin plus loin, on séchait la lymphe sur de petites pointes d'ivoire, des plumes ou des fils, ou on l'enfermait entre deux plaques de verre, puis on l'humectait avant usage. L'expédition espagnole de Balmis, partie en 1803, fit traverser l'Atlantique au vaccin dans le corps de 22 orphelins, vaccinés deux par deux pendant le voyage. La transmission de bras à bras pouvait aussi propager d'autres maladies, dont la syphilis.

Le vaccin de génisse. À Naples, les vaccinateurs entretenaient le virus sur des veaux dès le début du siècle. Après la présentation de la méthode à un congrès médical à Lyon en 1864, elle gagna la France puis toute l'Europe. On vaccinait les veaux par de légères scarifications sur une zone de peau rasée, et l'on recueillait quelques jours plus

tard la pulpe des pustules. En 1891, le médecin anglais Sydney Copeman montra qu'en mélangeant cette pulpe à de la glycérine, on tuait en quelques semaines la plupart des bactéries qu'elle contenait sans détruire le virus. La lymphe de génisse glycérinée, scellée dans de fins tubes de verre, devint le vaccin de référence en Grande-Bretagne vers 1900. Quand les virologues du XXe siècle examinèrent le virus des stocks de vaccin, ils constatèrent qu'il s'agissait d'un poxvirus voisin de celui de la vaccine des bovins (cowpox) mais distinct de lui, appelé vaccinia.

Pointes d'ivoire et plaques de verre scellées transportaient la lymphe séchée d'un vaccinateur à l'autre.

Les équipes du programme d'éradication retrouvaient chaque malade et vaccinaient son entourage.

Le vaccin lyophilisé et l'aiguille bifurquée. Sous la chaleur des tropiques, la lymphe liquide perdait son efficacité en un ou deux jours. Dans les laboratoires de l'Institut Lister à Elstree, au nord de Londres, Leslie Collier mit au point un vaccin lyophilisé, protégé par de la peptone, qui se conservait des mois sans réfrigération ; il y travailla entre 1948 et 1955. Pendant la campagne d'éradication lancée en 1967, l'OMS n'employa que du vaccin lyophilisé et fit contrôler les lots par des laboratoires de référence au Canada et aux Pays-Bas. Au début de la campagne, moins d'un vaccin sur dix en usage atteignait la norme. L'aiguille bifurquée, mise au point par les laboratoires Wyeth aux États-Unis dans les années 1960, est une courte tige d'acier terminée par deux pointes qui retiennent une seule gouttelette de vaccin. Le vaccinateur l'enfonçait légèrement dans la peau du haut du bras une quinzaine de fois sur une petite surface. Elle demandait quatre fois moins de vaccin qu'avant, pouvait être stérilisée et réutilisée, et son maniement s'apprenait en quelques minutes.

Les vaccins modernes. Les vaccins vivants atténués utilisent un germe affaibli jusqu'à ce qu'il ne provoque que rarement la maladie : le virus de la rougeole, par exemple, a été affaibli en le cultivant sur de nombreuses générations en culture cellulaire, et le BCG contre la tuberculose est une bactérie atténuée. Les vaccins inactivés partent d'un germe mis en culture, les virus sur œufs ou sur cellules, puis tué par un produit chimique comme le formaldéhyde ; le vaccin de Jonas Salk contre la poliomyélite, en 1955, était fait ainsi. Les anatoxines contre le tétanos et la diphtérie sont des toxines bactériennes inactivées de façon comparable. Les vaccins sous-unitaires ne contiennent que certaines parties purifiées du germe : le vaccin recombinant contre l'hépatite B, autorisé aux États-Unis en 1986, est une protéine virale produite par des levures porteuses de son gène. Les vaccins à ARN messager ne contiennent aucune partie du germe. L'ARN est copié par des enzymes à partir d'une matrice d'ADN, purifié, puis enrobé de minuscules particules de lipides qui le font entrer dans les cellules.

Le contrôle de la qualité. La production part d'un lot de semence de virus, de bactéries ou de cellules conservé congelé, pour que la souche ne dérive pas d'un lot à l'autre. Les fabricants contrôlent chaque lot (identité, stérilité, pureté, activité) et en gardent des échantillons. Dans la plupart des pays, une autorité nationale et son laboratoire de contrôle examinent ces résultats, et refont parfois les analyses, avant que chaque lot puisse être libéré.

> **Sécurité.** Cette section décrit la fabrication des vaccins en laboratoire et en usine. N'essayez jamais de préparer vous-même un vaccin : une préparation artisanale peut contenir des germes dangereux, provoquer une infection grave et ne donner aucune protection. N'utilisez que des vaccins autorisés issus de lots libérés, administrés par des professionnels de santé ou, pour les rares produits autorisés à cet usage, exactement selon la prescription.

Histoire et évolution

Bien avant les vaccins, il y eut la variolisation : on infectait volontairement une personne en bonne santé avec la matière d'une pustule de variole. Elle provoquait en général une forme plus légère suivie d'une immunité à vie, mais certains en mouraient. La pratique était ancienne en Chine, en Inde et dans l'Empire ottoman. Lady Mary Wortley Montagu l'observa à Constantinople et fit varioliser sa fille à Londres en 1721, ce qui contribua à la répandre en Grande-Bretagne.

Dans l'ouest de l'Angleterre, les fermiers avaient remarqué depuis longtemps que les trayeuses ayant eu la vaccine semblaient épargnées par la variole. Le chirurgien John Fewster en parla en 1768, et en 1774 Benjamin Jesty, fermier du Dorset, inocula volontairement la vaccine à sa femme et à deux de leurs enfants pendant une épidémie.

Edward Jenner, médecin à Berkeley, dans le Gloucestershire, transforma cette observation populaire en expérience. Le 14 mai 1796, il préleva de la matière sur une pustule de vaccine de la main de la trayeuse Sarah Nelmes et l'introduisit dans le bras de James Phipps. Quelques semaines plus tard, il exposa l'enfant à la matière variolique, et Phipps ne tomba pas malade. La Royal Society ne publia pas son premier rapport ; en 1798, Jenner fit donc paraître à ses frais un court ouvrage, l'*Inquiry*, qui rapportait ce cas et d'autres. En quelques années, la vaccination gagna toute l'Europe et les Amériques.

À la fin des années 1870, Louis Pasteur constata qu'une culture de la bactérie du choléra des poules, laissée vieillir, ne rendait plus malade mais protégeait encore les volailles. Il mit au point des vaccins contre le charbon du mouton en 1881, puis contre la rage. Le 6 juillet 1885, Joseph Meister, un garçon de neuf ans mordu par un chien enragé, commença le traitement et survécut. On le présente d'ordinaire comme le premier vacciné contre la rage, mais des historiens ont retrouvé des essais antérieurs sur des malades en mai et juin 1885. Le virus de la rage met en général des semaines à atteindre le cerveau ; une vaccination faite peu après la morsure, avant tout symptôme, pouvait donc encore empêcher la maladie. Toute exposition suspecte exige des soins médicaux immédiats. Le XXe siècle ajouta des vaccins contre la diphtérie, le tétanos, la coqueluche, la tuberculose, la poliomyélite, la rougeole et bien d'autres maladies.

Pasteur fabriquait ses vaccins en affaiblissant le microbe de la maladie elle-même.

En 1967, l'Organisation mondiale de la santé lança une campagne renforcée pour éliminer la variole. Le dernier cas naturel survint en Somalie en 1977, et le 8 mai 1980 l'Assemblée mondiale de la santé déclara la maladie éradiquée. En 2020, des vaccins à ARN messager, fruits de plusieurs décennies de recherche, furent déployés contre le COVID-19 moins d'un an après l'identification du virus.

Chiffres clés

Première vaccination de Jenner
14 mai 1796, Berkeley (Gloucestershire)

Début du traitement antirabique de Joseph Meister
6 juillet 1885, Paris

Aiguille bifurquée
Années 1960, laboratoires Wyeth ; quatre fois moins de vaccin qu'auparavant

Létalité de la variole
Environ 30 % des cas (variole majeure)

Éradication de la variole
Déclarée le 8 mai 1980 par l'Organisation mondiale de la santé

Sources

1. Smallpox · World Health Organization https://www.who.int/health-topics/smallpox
2. Jenner, Fewster and Jesty · British Society for the History of Medicine https://bshm.org.uk/jenner-fewster-and-jesty/
3. The final years 1877–1887 · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/en/about-us/final-years-1877-1887
4. Edward Jenner · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Jenner
5. Edward Jenner's ivory vaccination points, England, 1821 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co148487/edward-jenners-ivory-vaccination-points-england-1821-vaccination-point
6. Ivory vaccination points in a wooden box, Europe, 1801-1900 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co148479/ivory-vaccination-points-europe-1801-1900-vaccination-point
7. Vaccine points used by Edward Jenner · Wellcome Collection https://wellcomecollection.org/works/j36r9neu
8. The XIX century smallpox prevention in Naples and the risk of transmission of human blood-related pathogens · Journal of Translational Medicine https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4328853/
9. Sydney Arthur Monckton Copeman · Royal College of Physicians https://history.rcp.ac.uk/inspiring-physicians/sydney-arthur-monckton-copeman
10. Collier, Professor Leslie Harold (papers) · Wellcome Collection https://wellcomecollection.org/works/egjmdv8t
11. Smallpox vaccines · World Health Organization https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/smallpox-vaccines
12. Donald Ainslie Henderson (1928–2016): smallpox eradication, leadership and legacy · The Journal of Infectious Diseases https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5388283/
13. Different types of vaccines · History of Vaccines (College of Physicians of Philadelphia) https://historyofvaccines.org/vaccines-101/what-do-vaccines-do/different-types-vaccines/
14. Lot release of vaccines by NRAs/NCLs · World Health Organization https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/vaccine-standardization/lot-release-of-vaccines
15. Smallpox and its eradication (Fenner, Henderson, Arita, Ježek, Ladnyi), chapter 7 · World Health Organization https://iris.who.int/handle/10665/39485
16. Smallpox vaccination in 2003: key information for clinicians · Clinical Infectious Diseases https://doi.org/10.1086/374792
17. Expected vaccine reactions (smallpox vaccine) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/smallpox/hcp/vaccines/expected-vaccine-reactions.html
18. Vaccination, Encyclopaedia Britannica, 9th edition, volume 24 · Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/Page:Encyclop%C3%A6dia_Britannica,_Ninth_Edition,_v._24.djvu/40

Faits vérifiés le 2026-10-12

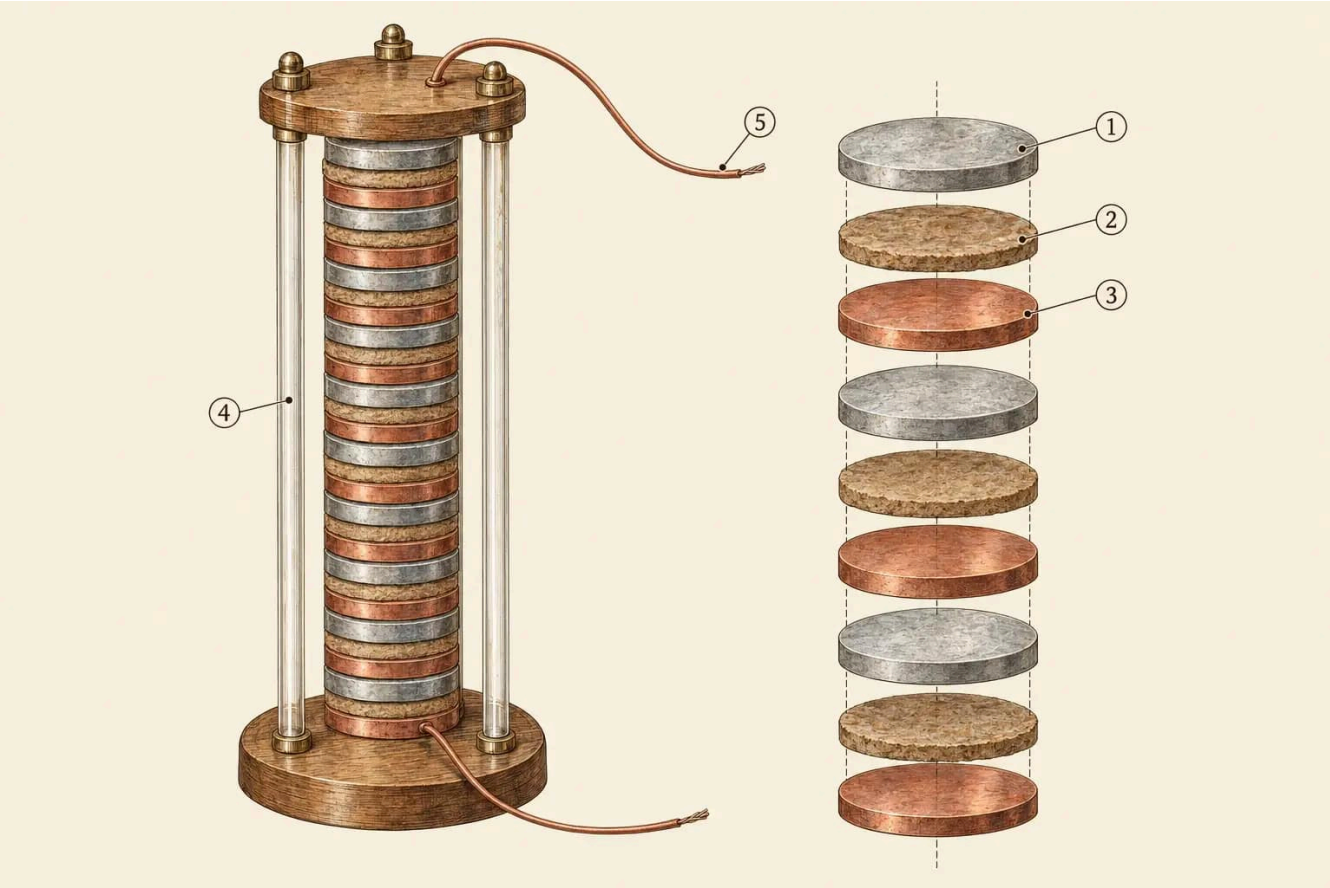
Pile électrique

Du courant tiré de la chimie

1800 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Bronze (p. 125)

Mène à: Moteur électrique (p. 280), Générateur électrique (p. 276), Accumulateur au plomb (p. 306), Cellule solaire (p. 372), Télégraphe électrique (p. 288)



1 Disque de zinc 2 Carton imbibé de saumure 3 Disque de cuivre 4 Tige de verre 5 Fil de sortie

Une pile électrique transforme en courant continu les réactions chimiques qui se produisent sur deux électrodes, séparées par un électrolyte qui conduit les ions. La pile d'Alessandro Volta, faite de zinc, de cuivre et d'eau salée, fut la première en 1800; toutes les piles et batteries venues ensuite, du bocal du télégraphe à la batterie lithium du téléphone, reposent sur le même principe.

Ce que c'est

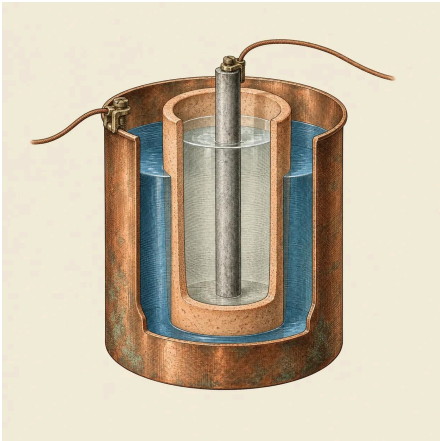
Une pile emmagasine de l'énergie sous forme chimique et la restitue en courant électrique dès qu'un circuit comportant une lampe ou un autre récepteur relie ses deux bornes. L'unité de base s'appelle un élément. À l'époque d'Alessandro Volta, le mot « batterie » désignait plusieurs éléments réunis, comme la colonne qu'il empila en 1800; aujourd'hui, il s'applique aussi à un élément seul.

Avant elle, l'électricité ne venait que par brèves étincelles; la pile donnait un courant durant des heures.

Comment ça marche

Chaque élément comporte un disque de zinc, un disque de cuivre et, entre les deux, une rondelle de carton ou de drap imbibée d'eau salée. Le zinc cède ses électrons plus facilement que le cuivre. Côté zinc, des atomes de métal passent dans la saumure sous forme d'ions et laissent leurs électrons dans le disque. Côté cuivre, une réaction reprend des électrons, en consommant l'oxygène dissous dans la saumure ou en libérant de l'hydrogène. Quand un circuit extérieur relie les deux extrémités, les électrons y circulent du zinc vers le cuivre, tandis que les ions traversent la couche humide et ferment le circuit.

Un couple zinc-cuivre dans la saumure fournit un peu moins d'un volt. Vingt couples en série additionnent leurs tensions, assez pour picoter des doigts mouillés : c'est ainsi que Volta éprouvait ses piles. L'intensité dépend de la surface des disques et de la vitesse de la réaction.



Dans la pile Daniell, du cuivre se dépose sur la paroi au lieu de l'hydrogène, et la tension reste stable.

À mesure que la pile travaille, l'oxygène dissous près du cuivre s'épuise et des bulles d'hydrogène commencent à le recouvrir : le courant baisse. Le poids de la colonne chasse aussi la saumure des couches du bas, et le zinc se ronge. En 1836, John Frederic Daniell donna à chaque métal son propre liquide : le zinc dans une solution, le cuivre dans du sulfate de cuivre, avec une cloison poreuse entre les deux. Le cuivre se dépose à la place de l'hydrogène, et l'élément tient environ 1,1 volt pendant longtemps.

Dans un accumulateur, un courant inverse fait repartir la réaction à rebours.

Comment la construire

Une petite pile donne peu de tension et de courant, mais montre bien le principe.

Il faut quinze à vingt disques de cuivre (de vieilles pièces conviennent), autant de disques de zinc (tôle de zinc ou rondelles galvanisées), du papier buvard ou du carton découpé un peu plus petit, du sel, de l'eau, deux fils isolés et, si possible, un voltmètre.

Nettoyer le métal. Frotter chaque disque de cuivre au papier de verre fin jusqu'à ce qu'il brille.

Imbiber les intercalaires. Dissoudre deux bonnes cuillerées de sel dans un verre d'eau et y tremper le carton. Presser chaque rondelle pour qu'elle reste humide sans goutter : la saumure qui coule le long de la colonne court-circuite les éléments.

Empiler toujours dans le même ordre. Cuivre, intercalaire humide, zinc, puis recommencer dans le même ordre jusqu'en haut. Ne jamais inverser l'ordre en cours de route ni laisser les deux métaux d'un même élément se toucher au bord de l'intercalaire.

Tenir la colonne. Trois tiges de bois ou de verre plantées dans un socle la maintiennent droite sans l'écraser.

Brancher et mesurer. Fixer un fil au cuivre du bas, l'autre au zinc du haut. On obtient un peu moins d'un volt par élément. Une LED rouge demande environ deux volts et très peu de courant : relier sa patte longue au côté cuivre et sa patte courte au côté zinc, et ne l'essayer que sur quatre ou cinq éléments, où elle devrait luire faiblement. Branchée à l'envers sur davantage d'éléments, une LED peut être endommagée. Quand les intercalaires sèchent, après quelques heures, démonter la pile, laver et sécher les disques.

> **Sécurité.** La pile elle-même est à basse tension, mais un court-circuit sur une batterie puissante chauffe les fils au point de brûler la peau et de faire fondre l'isolant : ne jamais relier directement les bornes. Ne jamais brancher une pile ou une batterie sur le secteur, ni tenter de la recharger sur une prise murale. Ne pas ouvrir les batteries du commerce : les batteries au plomb contiennent de l'acide sulfurique, qui brûle la peau et les yeux, et dégagent de l'hydrogène explosif en charge ; les éléments au lithium peuvent prendre feu s'ils sont percés, écrasés ou court-circuités. Le sulfate de cuivre et les sels de zinc sont toxiques : porter gants et lunettes, se laver les mains, garder le matériel hors de portée des enfants.

Histoire et évolutions

Les pattes de grenouille de Galvani se contractaient dès qu'un arc de deux métaux reliait nerf et muscle.

Dans les années 1780, l'anatomiste bolonais Luigi Galvani vit des pattes de grenouille disséquées se contracter au contact simultané de deux métaux différents. En 1791, il publia sa théorie de « l'électricité animale ». Alessandro Volta, professeur de physique à Pavie, pensait que les métaux produisaient l'électricité et que la grenouille la détectait seulement ; il voulut le prouver sans animal.

Il relia d'abord des coupes d'eau salée par des lames de métal, puis construisit la pile, plus compacte. Le 20 mars 1800, il décrivit les deux dispositifs dans une lettre en français à Sir Joseph Banks, président de la Royal Society de Londres. La Société la publia la même année, avec une gravure de la pile : la première image imprimée d'une batterie.

En quelques semaines, William Nicholson et Anthony Carlisle décomposèrent l'eau en hydrogène et oxygène avec une pile. Peu après, Humphry Davy isola le sodium et le potassium grâce à de grandes batteries. Napoléon assista à une démonstration de Volta à Paris en 1801 et le récompensa ; l'unité de tension électrique, le volt, porte son nom.

Les lignes télégraphiques, qui avaient besoin d'un courant régulier, adoptèrent la pile Daniell. En 1859, Gaston Planté enroula deux feuilles de plomb en spirale, séparées par un intercalaire, et les plongea dans de l'acide sulfurique dilué. Johann Ritter avait présenté une pile d'accumulation expérimentale en 1803, mais celle de Planté fut la première batterie rechargeable vraiment utilisable. Perfectionné par Camille Faure en 1881, l'accumulateur au plomb fait encore démarrer la plupart des voitures.

La spirale de plomb de Planté, plongée dans l'acide dilué, pouvait être chargée et déchargée encore et encore.

En 1866, Georges Leclanché assembla un élément à barreau de zinc, barreau de carbone entouré de dioxyde de manganèse et solution de chlorure d'ammonium ; en 1868, vingt mille de ces piles servaient déjà sur les réseaux télégraphiques. On épaissit ensuite le liquide en pâte : cette « pile sèche » alimenta les premières lampes de poche et les postes de radio des années 1920. Les premières piles alcalines cylindriques commercialisées suivirent en 1959, et les batteries lithium-ion arrivèrent au début des années 1990.

Chiffres clés

Annonce
20 mars 1800, lettre à la Royal Society

Première batterie rechargeable utilisable
Élément plomb-acide de Gaston Planté, 1859

Tension d'un élément zinc-cuivre
Moins de 1 V dans la saumure ; 1,1 V en pile Daniell

Batteries lithium-ion
En vente depuis le début des années 1990

Sources

1. Voltaic Pile (1800) · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/voltaic-pile-1800/
2. Electricity and Magnetism Timeline, 1800 to 1819 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/timeline/1800-1819/
3. Volta and the Pile · The Electrochemical Society, Electrochemistry Encyclopedia https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-v01-volta.htm
4. Scientist of the Day: Alessandro Volta · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/alessandro-volta
5. Timeline of Battery Development · LibreTexts Chemistry https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Chem1_(Lower)/16%3A_Electrochemistry/16.07%3A_Timeline_of_Battery_Development
6. Battery History · Energizer https://oem.energizer.com/english/battery-history/

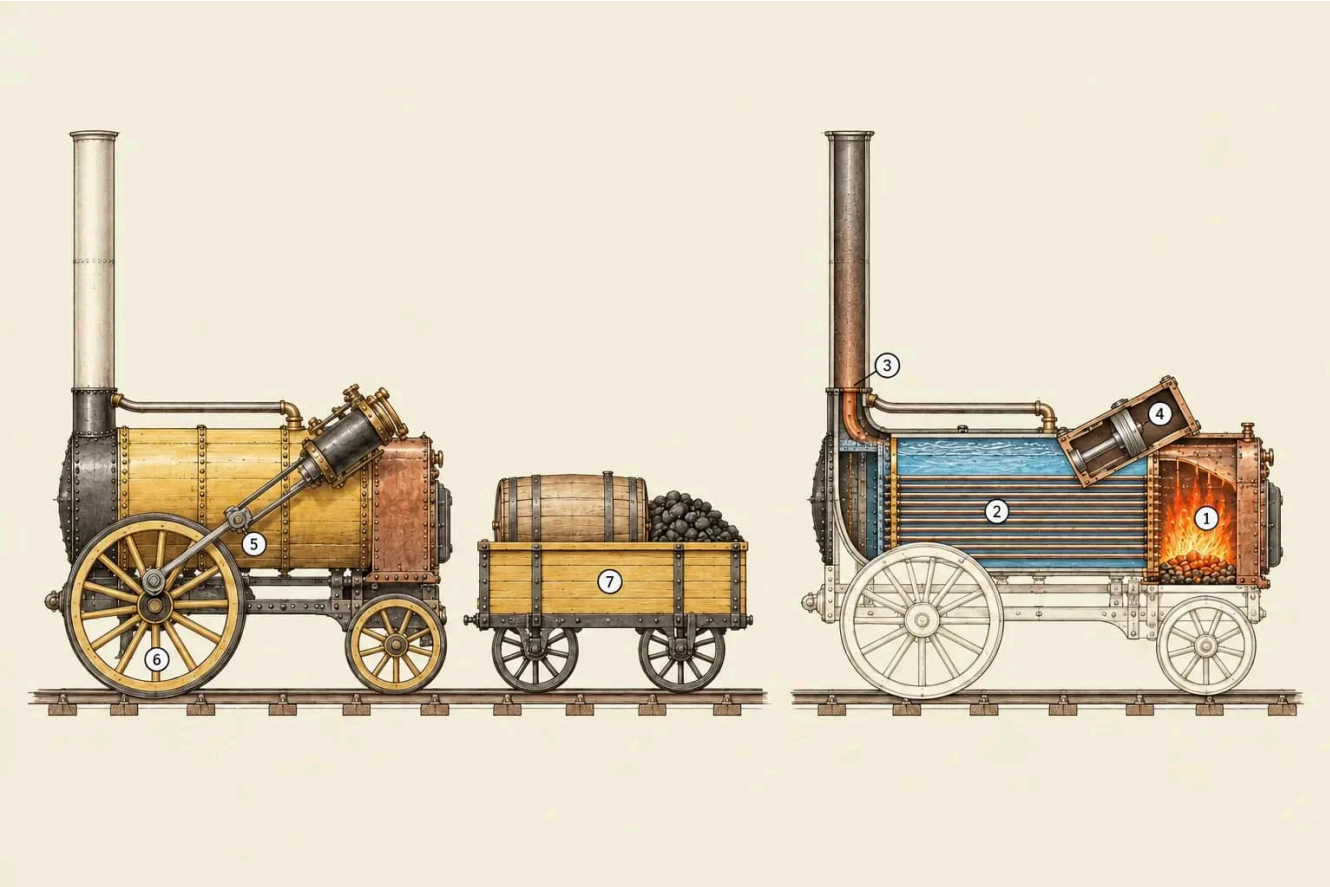
Faits vérifiés le 2026-10-11

Locomotive à vapeur

La vapeur sur des rails

1804 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Machine à vapeur (p. 229), Roue & essieu (p. 83)



1 Foyer 2 Tubes de fumée 3 Échappement et cheminée 4 Cylindre 5 Bielle 6 Roue motrice 7 Tender

Une locomotive à vapeur est une machine à vapeur montée sur roues, qui emporte son combustible et son eau et tire des trains sur des rails. Richard Trevithick fit rouler la première au pays de Galles en 1804, et la Rocket de Robert Stephenson, en 1829, fixa le modèle suivi par la plupart des locomotives ultérieures : une chaudière traversée de tubes de fumée, un échappement sous la cheminée et des cylindres attaquant directement les roues.

Ce que c'est

Une locomotive à vapeur est une machine à vapeur posée sur un châssis à roues, faite pour tirer des trains sur une voie ferrée. Elle emporte du charbon ou du coke et de l'eau, brûle le combustible dans un foyer et transforme la pression de la vapeur en rotation de ses roues motrices par des pistons et des bielles. Ses roues de fer roulent sur des rails de fer ou d'acier, beaucoup plus facilement que des roues sur une route, si bien qu'une seule machine tire de nombreux wagons chargés.

La planche montre la Rocket, construite en 1829 par Robert Stephenson and Company à Newcastle upon Tyne. Elle réunissait dans une même machine une chaudière traversée de nombreux tubes de fumée et un échappement

dans la cheminée, deux dispositifs que les locomotives à vapeur ont gardés ensuite.

Comment ça marche

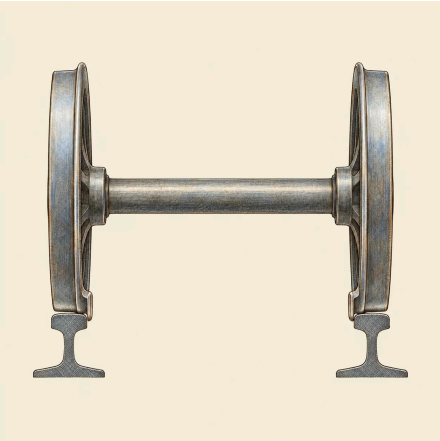
Le feu brûle sur une grille, dans le foyer placé à l'arrière. Ses gaz chauds traversent vers l'avant le corps de chaudière par 25 tubes de cuivre d'environ 76 mm de diamètre, baignés dans l'eau. Beaucoup de petits tubes offrent à l'eau bien plus de métal chaud qu'un seul gros carneau : sur la Rocket, les tubes fournissaient plusieurs fois la surface de chauffe des parois du foyer (les chiffres varient selon les sources). La vapeur s'accumule au-dessus de l'eau à environ 3,4 bar au-dessus de la pression atmosphérique.

De la chaudière, la vapeur gagne les deux cylindres, un de chaque côté. Un tiroir l'admet d'abord derrière le piston, puis devant, si bien que le piston est poussé dans les deux sens. Chaque tige de piston entraîne une bielle, qui fait tourner un maneton fixé dans la grande roue avant du même côté. Le poids qui repose sur cette paire de roues, environ 2,6 tonnes sur la Rocket, et l'adhérence entre roues et rails limitent l'effort de traction possible avant que les roues patinent.

La vapeur usée quitte les cylindres par un tuyau qui se termine en tuyère sous la cheminée ; chaque bouffée entraîne la fumée et aspire de l'air frais à travers le feu. Plus la machine travaille, plus le tirage est fort, ce qui aide la chaudière à suivre la consommation des cylindres ; le chauffeur doit malgré tout alimenter le feu et maintenir le niveau d'eau.

L'échappement souffle la vapeur usée dans la cheminée et active le feu à chaque coup de piston.

Comment la construire



Le boudin du bord intérieur de chaque roue maintient l'essieu entre les rails.

Les vraies locomotives se construisent dans des ateliers ferroviaires. Les chaudronniers cintrent des tôles de fer ou d'acier, les rivent pour former le corps cylindrique et le foyer, puis fixent les tubes dans les plaques tubulaires à chaque bout. Avant toute mise sous feu, la chaudière est éprouvée à l'eau à une pression supérieure à sa pression de service, fixée par la réglementation applicable, et contrôlée par un inspecteur indépendant. Les fondeurs coulent les cylindres, les mécaniciens les alèsent et y montent pistons et tiroirs, et les roues reçoivent des bandages de fer posés à chaud. Les chemins de fer touristiques qui restaurent aujourd'hui des locomotives sont soumis à des épreuves et à des contrôles du même ordre.

Une maquette sans vapeur montre comment les roues sont entraînées.

Découper la roue. Sciez dans du contreplaqué un disque d'environ 20 cm de diamètre. Collez solidement en son centre un tourillon qui servira d'axe, et percez un second trou à 5 cm du centre pour le maneton, un court tourillon collé. Vissez sur une planche deux tasseaux verticaux percés pour recevoir l'axe avec du jeu, de façon que la roue tourne librement entre eux.

Faire le cylindre. Collez un tube de carton ou de plastique d'environ 15 cm sur une cale de bois vissée sur la planche à côté de la roue, de façon que le tube soit dans le plan de la roue, son axe à la hauteur de l'axe de la roue et pointé vers son centre. Un tourillon qui coulisse librement à l'intérieur sert de tige de piston.

Relier le tout. Taillez une baguette de bois mince d'environ 25 cm pour la bielle. Percez un bout au diamètre du maneton et articulez l'autre au bout de la tige de piston avec un petit clou. Vérifiez que la roue peut faire un tour complet sans que la bielle touche le tube.

Faire tourner. Poussez et tirez la tige : la roue fait un tour pour 10 cm aller et 10 cm retour. Repérez les deux points morts, où le maneton, l'axe et le bout de la tige de piston sont alignés et où pousser ne sert à rien. Sur les vraies locomotives à deux cylindres, les manivelles des deux côtés sont décalées d'un quart de tour, si bien que l'une est toujours hors de son point mort.

> **Sécurité.** Ne chauffez jamais d'eau dans un récipient fermé et n'essayez pas de fabriquer une chaudière : la vapeur sous pression peut faire éclater un récipient et brûle gravement. Les modèles à vapeur vive ne se font fonctionner qu'à partir de kits du commerce, avec des chaudières éprouvées et des soupapes de sûreté en état, sous la surveillance d'un adulte. Gardez les doigts loin de la manivelle quand la roue tourne.

Histoire et évolution

Richard Trevithick, ingénieur de Cornouailles, construisit pour les forges de Penydarren, à Merthyr Tydfil, la première locomotive à rouler sur des rails. Le 21 février 1804, elle tira dix tonnes britanniques de fer, soit environ 10 tonnes, dans cinq wagons, avec soixante-dix hommes juchés dessus, le long de la voie de roulage menant au canal d'Abercynon, soit environ 14 km, à près de 8 km/h selon son propre récit. Au retour, un boulon cassa et la chaudière fuit ; la machine ne rentra que le lendemain. Trop lourde pour les plaques de fonte de la voie, qu'elle brisait, elle finit sa carrière en machine fixe actionnant un marteau de forge.

Sur la voie de Penydarren, de courtes plaques de fonte clouées sur des dés de pierre guidaient des roues sans boudin ; elles se fendirent sous le poids de la locomotive.

En octobre 1829, le chemin de fer de Liverpool à Manchester organisa à Rainhill un concours pour choisir ses locomotives. Cinq machines y prirent part et la Rocket fut la seule à terminer les épreuves. Ses parcours d'essai donnèrent des moyennes de 19 à 23 km/h selon la façon de les calculer ; sans charge, elle atteignit environ 48 km/h. Elle remporta le prix de 500 livres ainsi que la commande des machines de la ligne. À l'inauguration de la ligne en 1830, la Rocket renversa le député William Huskisson, qui mourut de ses blessures. Profondément remaniée en moins de dix-huit mois, elle fut mise de côté avant dix ans. Ses restes entrèrent en 1862 au musée du Bureau des brevets, à Londres, et appartiennent aujourd'hui aux collections du Science Museum Group.

Les locomotives suivantes devinrent bien plus grandes, avec davantage de roues accouplées pour porter le poids et tirer des trains lourds, et des pressions plus élevées. Le 3 juillet 1938, la Mallard du London and North Eastern Railway atteignit 203 km/h dans une descente au sud de Grantham, ce qui reste le record de la traction à vapeur. Elle fut retirée du service en 1963, quand le diesel et l'électricité eurent pris le relais.

Chiffres clés

Premier trajet sur rails

21 février 1804, forges de Penydarren, Merthyr Tydfil : dix tonnes britanniques de fer (environ 10 tonnes) et 70 hommes

Chaudière de la Rocket

25 tubes de cuivre, environ 3,4 bar au-dessus de la pression atmosphérique

Concours de Rainhill, octobre 1829

La Rocket roule en moyenne à 19 à 23 km/h selon les épreuves et atteint environ 48 km/h sans charge

Record de vitesse à vapeur

Mallard, 3 juillet 1938 : 203 km/h

Sources

1. Rocket locomotive (object 1862-5) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co26704
2. Richard Trevithick’s steam locomotive · Amgueddfa Cymru – Museum Wales https://museum.wales/blog/1012
3. London & North Eastern Railway steam locomotive 'Mallard' · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co205732
4. Rocket's engineering excellence · Science and Industry Museum https://blog.scienceandindustrymuseum.org.uk/rocket-engineering-excellence/
5. Stephenson's Rocket · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Stephenson%27s_Rocket
6. Penydarren tramplate · Amgueddfa Cymru – Museum Wales https://museum.wales/collections/online/object/11d39d27-d867-308a-b20a-9398afef1c6e
7. The Penydarren Tramroad · Industrial Railway Society, Industrial Railway Record https://shop.irsociety.co.uk/Archives/59/Penydarren.htm
8. Rocket · steamlocomotives.org https://www.steamlocomotives.org/locomotives/rocket
9. Rocket 0-2-2 Liverpool & Manchester Railway · Preserved British Steam Locomotives https://preservedbritishsteamlocomotives.com/rocket-0-2-2-liverpool-manchester-railway/

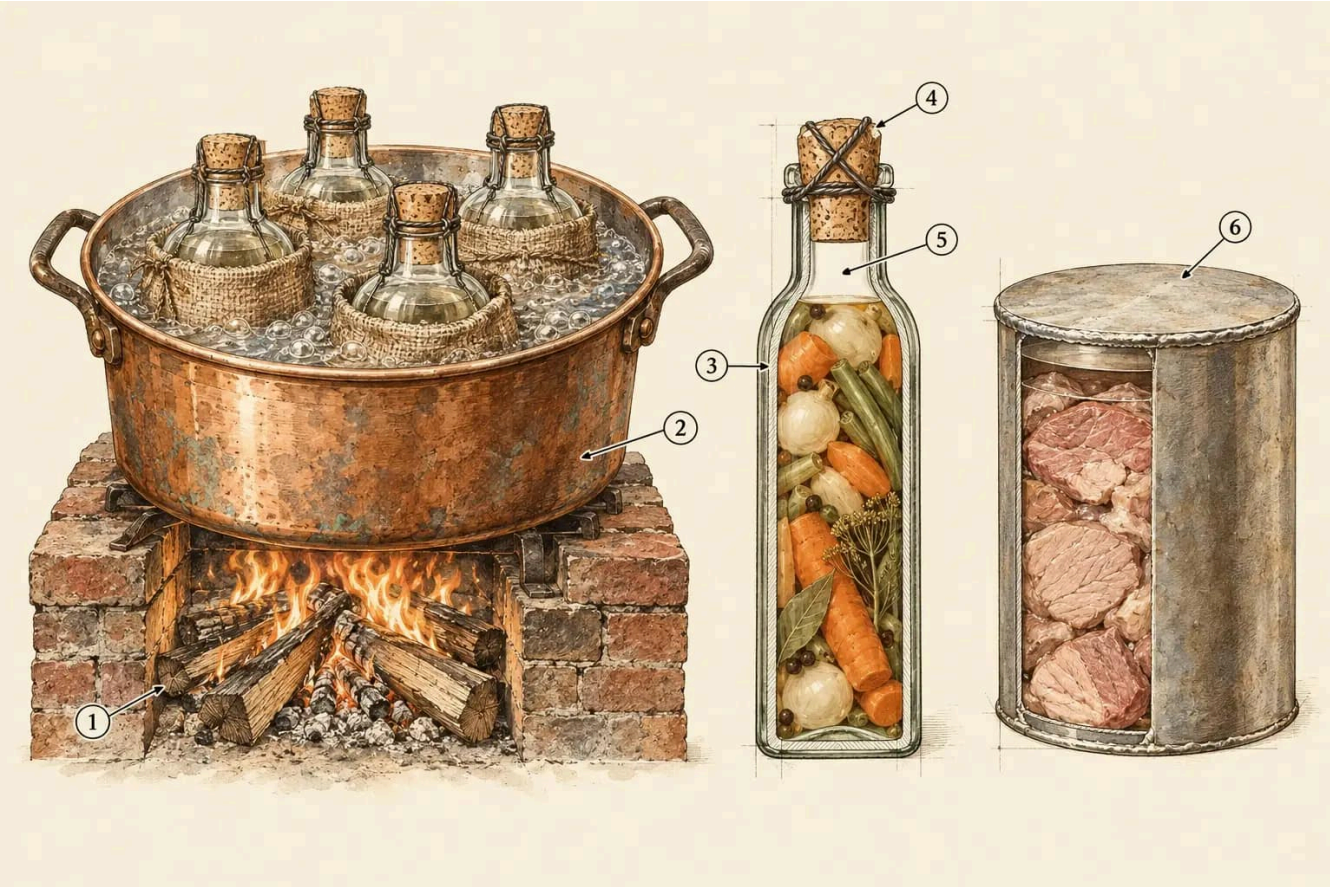
Faits vérifiés le 2026-10-12

Conserves & pasteurisation

Fermer, chauffer, tenir les microbes dehors

1810 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Verre (p. 134), Métallurgie du fer (p. 138), Maîtrise du feu (p. 9)



1 Feu de bois 2 Chaudron de cuivre plein d'eau bouillante 3 Bouteille de verre remplie de légumes
4 Bouchon de liège ficelé au fil de fer 5 Espace de tête laissé sous le bouchon 6 Couvercle soudé d'une boîte en fer-blanc

La conserve enferme l'aliment dans un bocal ou une boîte, puis le chauffe assez pour tuer les microbes qui le gâteraient; le couvercle fermé empêche les autres d'entrer. Nicolas Appert a publié la méthode en 1810, Louis Pasteur l'a expliquée un demi-siècle plus tard, et son traitement plus doux, la pasteurisation, a rendu le lait, le vin et la bière plus sûrs.

Ce que c’est

Le sel et le séchage conservent les aliments en privant les microbes d’eau. La conserve les tue: on enferme l’aliment dans un bocal ou une boîte et on chauffe le tout assez longtemps pour détruire les microbes capables de le gâter ou de rendre malade. Tant que la fermeture tient, aucun germe ne peut entrer, et l’aliment se garde des mois sans froid.

La planche montre la méthode publiée par Nicolas Appert en 1810, des bouteilles bouchées plongées dans l’eau bouillante, à côté de la boîte en fer-blanc soudée que les Anglais ont adoptée peu après. La pasteurisation, sa

cousine plus douce, chauffe le lait, le vin ou la bière sous le point d'ébullition. Elle tue la plupart des germes pathogènes, sans éliminer tous les microbes : le lait pasteurisé doit donc rester au frais.

Comment ça marche

À 100 °C, les cellules actives des bactéries, levures et moisissures meurent en quelques minutes. Pendant la chauffe, l'air s'échappe sous le couvercle. En refroidissant, le contenu se rétracte, la vapeur de l'espace de tête se condense, et le vide plaque le couvercle sur le bord du bocal.

Le plus coriace est Clostridium botulinum. Sa spore résiste à l'ébullition, et on en trouve sur la plupart des légumes frais. À l'air libre elle reste inerte ; dans un bocal fermé d'aliment humide et peu acide, à température ambiante, elle germe et produit la toxine botulique, l'une des substances les plus toxiques connues, souvent sans aucun signe visible.

Les spores ne se développent pas à un pH de 4,6 ou moins : la plupart des fruits, les confitures, les cornichons au vinaigre, les tomates et les figues additionnées d'acide sont donc sûrs après un bain-marie bouillant, qui tue les levures et moisissures qui les gâteraient. Légumes, viande et poisson sont moins acides. Il faut détruire leurs spores à 116-121 °C, et l'eau n'atteint cette température que sous pression, dans un autoclave domestique réglé à environ 0,7 à 1 bar au-dessus de la pression atmosphérique. Chaque aliment, mode de remplissage et taille de bocal y a sa durée testée ; à 100 °C, il faudrait des heures pour le même résultat, et aucune recette éprouvée ne traite ces aliments au bain-marie.

L'autoclave domestique garde la vapeur sous pression : les bocaux montent à 116-121 °C au lieu de 100 °C.

Les durées sont mesurées par des thermomètres placés au point le plus lent à chauffer de chaque bocal et de chaque aliment. En altitude, l'eau bout sous 100 °C : les tables ajoutent du temps ou de la pression.

La pasteurisation se contente de températures plus basses. Les laiteries chauffent en général le lait à 72 °C pendant 15 secondes, ou à 63 °C pendant 30 minutes, puis le refroidissent. Cela détruit les bactéries actives de la tuberculose, de la salmonellose et d'autres maladies transmises par le lait. Les spores et quelques microbes inoffensifs survivent, et le lait tourne en quelques jours hors du réfrigérateur.

Comment s'y prendre

Ne suivez que des consignes officielles éprouvées : le guide de l'USDA et le National Center for Home Food Preservation aux États-Unis, Santé Canada, ou l'agence sanitaire de votre pays. Les étapes ci-dessous concernent le seul bain-marie, pour les aliments acides.

Choisir une recette testée. La suivre à la lettre : taille du bocal, espace de tête, acide ajouté (jus de citron en bouteille ou acide citrique pour les tomates), durée et correction d'altitude. Ajouter oignon ou poivron à des tomates peut les rendre dangereuses.

Réunir le matériel. Une grande marmite avec couvercle et grille, des bocaux de conserve au bord intact, des couvercles neufs en deux parties (une capsule plate à joint, tenue par une bague à vis) et une pince à bocaux. Tout laver à l'eau chaude savonneuse. Si la durée de traitement est inférieure à 10 minutes, stériliser d'abord les bocaux vides 10 minutes dans l'eau bouillante, plus une minute par tranche de 300 m d'altitude au-delà de 300 m.

La capsule à joint ne sert qu'une fois ; la bague se réutilise pendant des années.

Remplir et fermer. Laisser l'espace de tête indiqué, chasser les bulles d'air, essuyer le bord et visser la bague sans forcer, pour que l'air puisse sortir.

Traiter à la chaleur. Poser les bocaux sur la grille dans l'eau chaude, recouverts d'au moins 2,5 cm d'eau (5 cm au-delà de 30 minutes). Ne lancer le chronomètre qu'à pleine ébullition ; si elle s'arrête, reprendre la durée à zéro. À la fin, couper le feu, ôter le couvercle et attendre cinq minutes.

Refroidir et vérifier. Sortir les bocaux bien droits et les laisser 12 à 24 heures. Ôter les bagues et appuyer sur chaque capsule : bien fermée, elle est creusée au centre et ne bouge pas. Mettre un bocal mal fermé au réfrigérateur et le consommer dans les jours qui suivent.

Ranger et surveiller. Garder les bocaux datés au frais, au sec et à l'abri de la lumière. Avant d'ouvrir, chercher un couvercle bombé ou desserré, une fuite, de la mousse, un trouble, de la moisissure ou une odeur anormale.

> **Sécurité.** Le botulisme est rare mais peut tuer. Ne jamais traiter légumes, viande, poisson, volaille ou plats qui en contiennent au bain-marie, au four ou en marmite ouverte, sauf s'ils ont été acidifiés selon une recette de conserve au vinaigre testée : sinon il leur faut un autoclave et un barème testé sous pression. Il n'existe aucune méthode domestique testée pour le lait et les produits laitiers : ne les mettez jamais en conserve. Ne jamais raccourcir une durée ni réduire l'acide. Ne jamais goûter un bocal suspect : la toxine ne se voit pas, ne se sent pas et n'a pas de goût. Dans le doute, jetez. Vision floue ou double, paupières tombantes, élocution difficile, mal à avaler ou faiblesse qui gagne le corps après avoir mangé une conserve sont une urgence : appelez sans attendre le numéro d'urgence local (le 15 ou le 112 en France). L'eau bouillante et les bocaux chauds brûlent : utilisez une pince.

Histoire et évolution

Confiseur à Paris, Appert commence ses essais dans les années 1790, quand la France en guerre a besoin de vivres qui se gardent. Le 30 janvier 1810, l'État lui accorde 12 000 francs à condition qu'il publie son procédé, et son livre paraît la même année. Il n'a jamais su pourquoi sa méthode marchait.

La même année, Peter Durand obtient un brevet britannique qui inclut des boîtes en fer-blanc, de la tôle de fer étamée. Bryan Donkin et John Hall le rachètent et ouvrent une conserverie en 1812, où chaque boîte est soudée à la main. Dès 1813, ils fournissent l'armée et la marine britanniques. En 1981, l'équipe d'Owen Beattie suggère que le plomb de boîtes mal soudées a contribué à affaiblir l'expédition arctique perdue de John Franklin, partie en 1845 ; des études osseuses de 2013 et 2018 montrent qu'une bonne part de ce plomb avait été absorbée avant le départ et les résultats de 2018 ne confirment pas qu'il ait joué un rôle décisif.

On ouvrait les premières boîtes au marteau et au burin ; l'ouvre-boîte n'est venu que des décennies plus tard.

Louis Pasteur montre dans les années 1850 et 1860 que fermentations et altérations sont l'œuvre de microbes vivants, et brevète en 1865 le chauffage du vin pour l'empêcher de se gâter. La pasteurisation du lait est proposée en 1886. Le lait transmettait alors tuberculose, scarlatine et diarrhées du nourrisson, mais l'historien

Peter Atkins constate qu’en Grande-Bretagne la pasteurisation s’est diffusée lentement et n’a guère pesé avant les années 1920 ; en 1921, environ la moitié du lait de Londres était traitée par la chaleur.

Les conserveries adoptent les autoclaves à vapeur au milieu du XIXe siècle. Des machines ferment les boîtes sans soudure dès les années 1890, les boîtes « sanitaires » à fond serti se répandent au début du XXe siècle, et vers 1900 les durées de traitement commencent à reposer sur la bactériologie. À partir des années 1980, la soudure électrique a peu à peu remplacé la soudure à l’étain sur la couture latérale.

Chiffres clés

Prix d'Appert
12 000 francs de l'État, le 30 janvier 1810, à condition de publier la méthode

Seuil d'acidité pour le bain-marie
pH de 4,6 ou moins

Aliments peu acides
116 à 121 °C, atteints seulement sous pression

Pasteurisation du lait
72 °C pendant 15 secondes, ou 63 °C pendant 30 minutes

Botulisme
Symptômes en général 12 à 36 heures après le repas ; mortel dans 5 à 10 % des cas

Sources

1. Ensuring Safe Canned Foods · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/ensuring-safe-canned-foods/
2. How to Use Boiling Water and Pressure Canners · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/recommended-canners/
3. Recommended Jars and Lids · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/recommended-jars-and-lids/
4. Cooling Jars and Testing Jar Seals · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/cooling-jars-and-testing-jar-seals/
5. Selecting the Correct Processing Time · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/selecting-the-correct-processing-time/
6. Sterilization of Empty Jars · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/sterilization-of-empty-jars/
7. Preventing Botulism · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/botulism/prevention.html
8. Home canning safety · Health Canada https://www.canada.ca/en/health-canada/services/general-food-safety-tips/home-canning-safety.html
9. Canning Controversies: No to Home Canning Dairy Products · Clemson Cooperative Extension, Home & Garden Information Center https://hgic.clemson.edu/canning-controversies/
10. Botulism (fact sheet) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/botulism
11. Nicolas Appert · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Nicolas_Appert
12. Nicolas Appert · Encyclopedia.com (World of Invention; Encyclopedia of Food and Culture) https://www.encyclopedia.com/people/food-and-drink/food-and-cooking-biographies/nicolas-appert
13. 30 janvier 1810 : Nicolas Appert, inventeur de la conserve · Hérodote.net https://www.herodote.net/30_janvier_1810-evenement-18100130.php
14. Scientist of the Day: Bryan Donkin · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/bryan-donkin/
15. Food processing: canning (Technology in Australia 1788–1988) · Australian Science and Technology Heritage Centre, University of Melbourne https://austehc.unimelb.edu.au/tia/084.html
16. Louis Pasteur : un héritage universel · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/fr/journal-recherche/dossiers/louis-pasteur-heritage-universel
17. White Poison? The Social Consequences of Milk Consumption, 1850–1930 (Atkins, 1992) · Social History of Medicine 5, Durham University https://pjatkins.webspace.durham.ac.uk/wp-content/uploads/sites/201/2022/07/White-Poison-1992.pdf
18. Raw Milk Misconceptions and the Danger of Raw Milk Consumption · U.S. Food and Drug Administration https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/raw-milk-misconceptions-and-danger-raw-milk-consumption
19. Western researchers acquit tins in expedition's fate · Western News, Western University https://news.westernu.ca/2013/04/western-researchers-acquit-tins-in-expeditions-fate/
20. Researchers provide new insights into fate of Franklin Expedition · University of Saskatchewan https://news.usask.ca/articles/research/2018/researchers-provide-new-insights-into-fate-of-franklin-expedition-.php

Faits vérifiés le 2026-10-14

Bicyclette

Deux roues mues par les jambes

1817 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Roue & essieu (p. 83), Métallurgie du fer (p. 138)

1 Guidon 2 Douille de direction et fourche 3 Selle 4 Manivelle et plateau 5 Chaîne 6 Pignon arrière 7 Pneumatique

La bicyclette est une machine à deux roues que le cycliste tient en équilibre en braquant et qu'il propulse avec les jambes, par des pédales, une chaîne et un pignon sur la roue arrière. Issue de la draisienne de bois de Karl Drais en 1817, elle prend en 1885 la forme de la bicyclette « de sécurité » à chaîne qui, une fois munie de pneus gonflés d'air, permet de parcourir une distance donnée en dépensant bien moins d'énergie qu'à pied.

Ce que c’est

Une bicyclette porte un cycliste sur deux roues placées l’une derrière l’autre. Assis sur une selle, il garde l’équilibre en braquant et entraîne la roue arrière avec ses jambes, par des pédales, des manivelles et une chaîne. Elle n’a pas de moteur, et l’entretien courant ne demande que quelques outils à main.

La planche montre une bicyclette de sécurité des années 1890, la disposition dont descendent presque tous les vélos actuels: deux roues de même taille, un cadre en tubes d’acier formant deux triangles et des pneus remplis d’air.

Comment ça marche

L'équilibre vient de la direction. Quand la bicyclette commence à pencher, le cycliste tourne légèrement la roue avant du côté où elle penche, et les roues reviennent se placer sous son poids. À l'allure d'un piéton, ces corrections doivent être plus amples, et c'est pourquoi un vélo qui roule lentement zigzague.

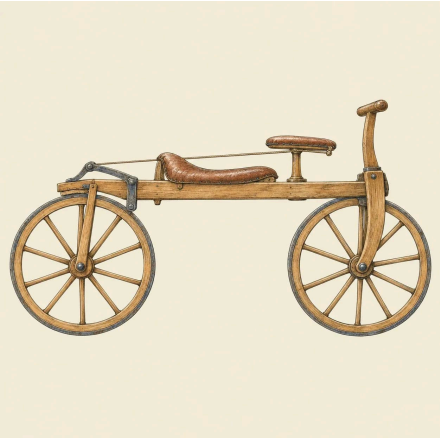
Les pédales font tourner deux manivelles fixées en sens opposés sur un axe qui traverse le bas du cadre. Un grand plateau denté, solidaire de la manivelle droite, tire une chaîne à rouleaux, qui fait tourner un petit pignon sur le moyeu arrière. Avec 44 dents à l'avant et 18 à l'arrière, un tour de pédales fait faire environ 2,4 tours à la roue, et une roue de 70 cm de diamètre parcourt alors près de 5,4 m. Les machines plus anciennes, aux pédales fixées sur le moyeu avant, n'avaient pas cette démultiplication : pour aller plus loin à chaque tour de pédales, il fallait une roue plus grande.

Une chaîne propre et graissée transmet presque tout le travail des jambes à la roue, jusqu'à 99 % environ lors d'essais en laboratoire. Sur le plat, au-delà de 30 km/h environ, les trois quarts au moins de l'effort servent à écarter l'air. Pour un même effort, un cycliste va environ trois fois plus vite qu'un marcheur, si bien qu'une distance donnée lui coûte bien moins d'énergie : selon les estimations, entre un tiers et un cinquième de ce que demande la marche.

Un pneumatique s'écrase autour d'un caillou au lieu de soulever toute la machine pour le franchir. Sur une mauvaise route, il roule donc plus doucement et gaspille moins d'effort que les bandages de caoutchouc plein utilisés auparavant. De fins rayons d'acier, maintenus sous tension, gardent ronde et rigide une jante légère.

Le pneu des années 1890 : une chambre à air gonflée dans une enveloppe de caoutchouc et de toile.

Comment la construire



La draisienne de 1817 n'avait pas de pédales : on avançait en poussant le sol d'un pied puis de l'autre, et l'on ralentissait avec un frein arrière tiré par une cordelette.

La machine de Drais était un ouvrage de charpentier et de charron : une poutre de frêne, deux roues de bois cerclées de fer, une fourche avant pivotant sur une broche de fer, une selle rembourrée, une planchette pour les avant-bras et un frein arrière commandé par une cordelette. Pour essayer aujourd'hui la même façon de rouler, le plus sûr est de transformer une petite bicyclette en bon état en draisienne : le cadre, les roues et les freins restent ceux d'origine.

Choisir la bicyclette. Elle doit être assez petite pour que le cycliste, selle au plus bas, pose les deux pieds à plat au sol, genoux légèrement fléchis, et elle doit avoir deux freins commandés à la main, à l'avant et à l'arrière : un frein à rétropédalage cesse de fonctionner dès que la chaîne est retirée. Vérifiez que le cadre n'a pas de fissure, que les roues tournent droit et que les deux freins fonctionnent.

Retirer la transmission. Démontez les deux pédales avec une clé à pédales ; la pédale gauche a un pas inversé et se dévisse dans le sens des aiguilles d'une montre. Pour retirer la chaîne, ouvrez son attache rapide ou chassez un axe avec un dérive-chaîne, ou confiez l'opération à un vélociste. Si vous avez un extracteur de manivelles, enlevez aussi les manivelles et le plateau, pour que rien ne puisse accrocher les jambes.

Régler la selle. Descendez la selle jusqu'à ce que les deux pieds reposent à plat, en gardant le repère d'insertion minimale de la tige de selle caché dans le cadre, et serrez fermement le collier.

Essayer les freins. Serrez chaque levier en poussant la bicyclette vers l'avant : la roue doit s'arrêter. Sinon, réglez le frein ou faites-le régler chez un vélociste avant que quiconque roule.

Apprendre à glisser. Sur un chemin plat et tranquille, marchez d'abord à califourchon, puis poussez d'un pied puis de l'autre et levez les deux pour de courtes glissades, en freinant pour vous arrêter.

> **Sécurité.** Portez un casque et roulez loin de la circulation. Vérifiez avant chaque sortie les freins, les écrous de roue ou les blocages rapides et le collier de selle. Gardez les doigts loin des rayons en mouvement et des dents du plateau s'il est encore monté, et n'abordez pas de descente avant de savoir vous arrêter à coup sûr.

Histoire et évolution

Karl Drais, fonctionnaire de l'administration forestière du pays de Bade, sort de Mannheim sur sa Laufmaschine le 12 juin 1817. Les récits de cette sortie parlent de 13 à 15 km en une heure environ ; un essai chronométré sur 12,5 km donne une moyenne de plus de 12 km/h, plus du double de l'allure d'un marcheur. La machine est vendue en France dès 1818 sous le nom de vélocipède et copiée en Grande-Bretagne sous celui de hobby horse. Un exemplaire conservé pèse 23 kg ; les machines qui subsistent ont un frein arrière commandé par une cordelette. Les routes sont mauvaises, et la mode passe en quelques années.

Dans les années 1860, à Paris, on fixe des manivelles et des pédales sur la roue avant. On discute encore pour savoir si l'idée revient au carrossier Pierre Lallement ou à l'atelier de Pierre Michaux. Lallement l'emporte aux États-Unis et y obtient un brevet le 20 novembre 1866 ; les machines de Michaux lancent en France le premier engouement pour le vélocipède à la fin de la décennie. Leurs roues de bois cerclées de fer leur valent en anglais le surnom de boneshakers, les « secoue-os ». Dans les années 1870, les rayons métalliques et les bandages de caoutchouc plein allègent les roues, et la roue avant grandit autant que les jambes du cycliste le permettent. Ces grands bis sont rapides, mais au moindre obstacle le cycliste peut passer la tête la première par-dessus le guidon.

Sur le grand bi des années 1870, les pédales entraînaient directement la roue avant : la vitesse dépendait de la taille de cette roue.

La bicyclette de sécurité règle ce problème en plaçant le cycliste bas, entre deux petites roues, et en entraînant la roue arrière par une chaîne. En 1885, John Kemp Starley construit la Rover à Coventry ; l'exemplaire conservé à Londres pèse 16,8 kg et a encore des bandages pleins. En 1887 ou 1888 (les sources divergent), John Boyd Dunlop, vétérinaire à Belfast, fabrique des pneus gonflés d'air pour le tricycle de son fils et les fait breveter le 7 décembre 1888. Le brevet est ensuite annulé, car Robert William Thomson avait breveté la même idée dans les années 1840, mais les pneus Dunlop sont fabriqués à Belfast dès la fin de 1890. En quelques années, le cadre en losange et le pneumatique deviennent la norme, et la bicyclette est utilisée aussi bien par les femmes que par les hommes. La roue libre, les changements de vitesse et de meilleurs freins viennent ensuite, sans modifier la disposition.

Chiffres clés

Première sortie en draisienne

12 juin 1817, au départ de Mannheim : 13 à 15 km en une heure environ (les récits divergent)

Brevet du pneumatique Dunlop

7 décembre 1888 (annulé ensuite : R. W. Thomson avait breveté l'idée dans les années 1840)

Rendement de la chaîne

Jusqu'à 99 % environ avec une chaîne propre et graissée

Bicyclette Rover

1885, Coventry ; 16,8 kg, transmission par chaîne, bandages pleins

Énergie par rapport à la marche

Entre un tiers et un cinquième pour la même distance (les estimations varient)

Sources

1. Draisienne · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/draisienne/
2. Rover 'Safety' Bicycle, 1885 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co25833/rover-safety-bicycle-1885
3. J. B. Dunlop · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/J._B._Dunlop
4. Pierre Lallement and the Modern-Day Pedal Bicycle · Connecticut Humanities https://connecticuthistory.org/pierre-lallement-and-the-modern-day-pedal-bicycle-today-in-history-november-20
5. Bicycle performance · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_performance
6. Laufmaschine (draisine) by Karl Drais · Klassik Stiftung Weimar https://www.klassik-stiftung.de/startseite/digital/sammlungshighlights/laufmaschine/
7. Gain Ratios · Sheldon Brown https://www.sheldonbrown.com/gain.html
8. Glossary: Chain · Sheldon Brown https://www.sheldonbrown.com/gloss_ch.html
9. H. Renold · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/H._Renold
10. Roller chain sprocket diameters · Engineers Edge https://www.engineersedge.com/hardware/roller_chain_sprocket_diameters_13887.htm

Faits vérifiés le 2026-10-12

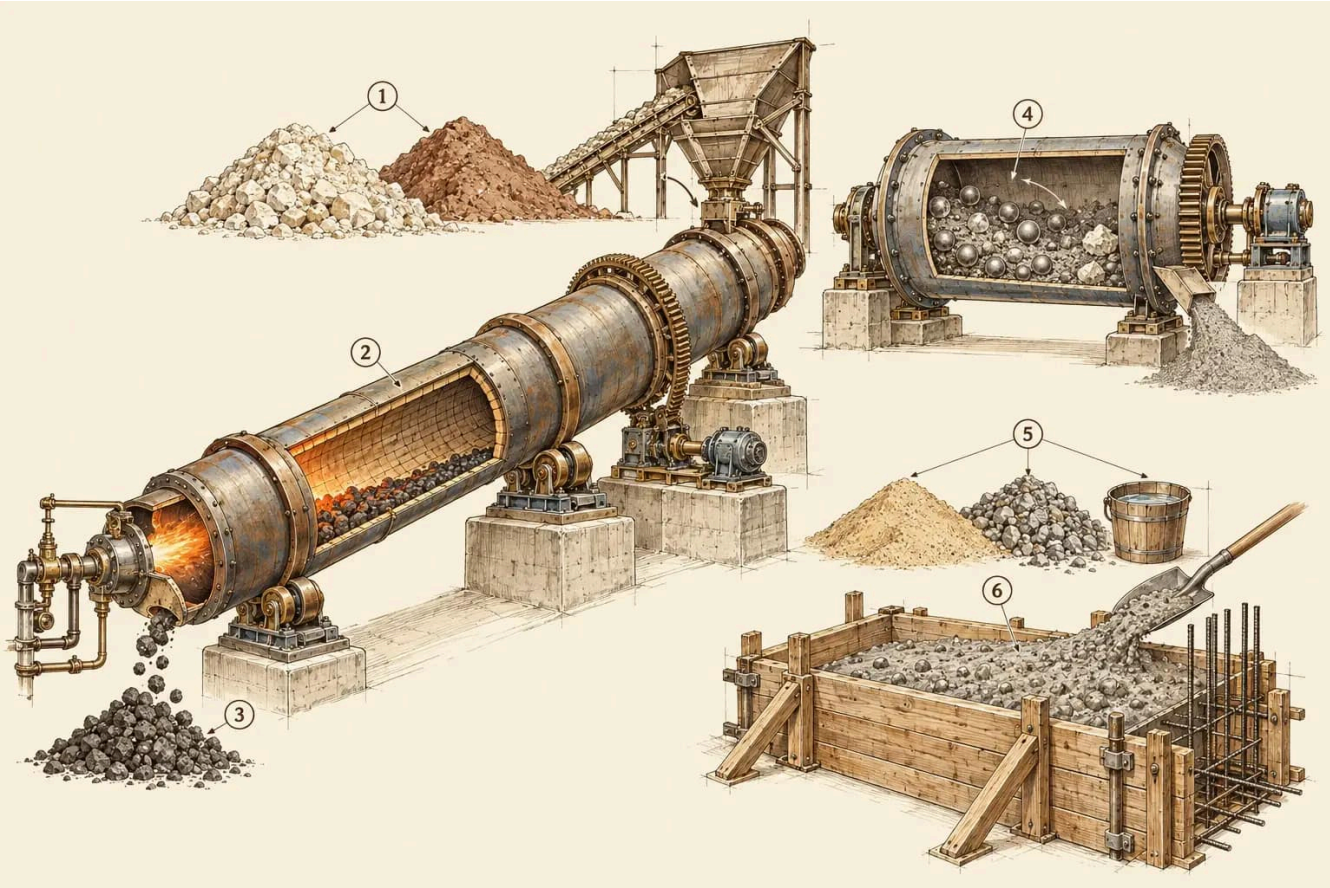
Ciment Portland

Le liant qui durcit sous l'eau

1824 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Chaux et mortier de chaux (p. 31), Béton romain (p. 167), Mesures et étalons (p. 129)

Mène à: Béton armé (p. 311)



1 Calcaire et argile concassés 2 Four rotatif, flamme à l'extrémité basse 3 Nodules de clinker 4 Broyeur: clinker et un peu de gypse 5 Sable, gravier et eau pour le mélange 6 Coffrage en bois rempli de béton frais

Le ciment Portland est un mélange de calcaire et d'argile cuit vers 1 450 °C en nodules durs, le clinker, puis broyé avec un peu de gypse. Avec l'eau, il durcit par réaction chimique, même immergé, et lié au sable et au gravier il donne le béton, le matériau de construction le plus utilisé au monde.

Ce que c'est

Le ciment Portland est une poudre grise: du calcaire et de l'argile cuits jusqu'à fondre en partie en morceaux durs, le clinker, que l'on broie ensuite avec un peu de gypse. Avec l'eau, il forme une pâte qui raidit en quelques heures et continue de durcir pendant des semaines.

C'est un liant hydraulique: il durcit en réagissant avec l'eau, au fond d'une tranchée humide comme dans la mer. Le mortier de chaux aérienne, lui, durcit lentement par carbonatation, au contact de l'air. Le béton romain résistait à l'eau grâce à la pouzzolane, une cendre volcanique dont la silice réagit avec la chaux éteinte. Dans le ciment

Portland, la chaux et la silice de l'argile sont déjà combinées dans le four : la poudre n'a besoin que d'eau, et devient bien plus résistante.

Mêlé à du sable et à du gravier, il donne le béton : ces granulats occupent l'essentiel du volume et le ciment les colle entre eux.

Comment ça marche

Le clinker à la sortie du four ; broyé avec un peu de gypse, il devient ciment.

La cuisson. Le cru contient en général environ quatre cinquièmes de calcaire, avec de l'argile ou du schiste qui apportent silice, alumine et oxyde de fer. Dans le four, le calcaire perd son gaz carbonique et devient chaux vive, qui se combine ensuite aux minéraux de l'argile. Vers 1 450 °C, une partie de la charge fond et le reste s'agglomère en nodules sombres. Un clinker courant contient environ 55 % d'alite et 20 % de bélite, deux silicates de calcium ; l'alite ne se forme qu'avec une cuisson poussée, au-delà de 1 300 °C environ. Le clinker est ensuite refroidi rapidement.

Le broyage. On moud le clinker très fin avec environ 5 % de gypse, qui empêche l'aluminate qu'il contient de faire raidir la pâte quelques minutes après le gâchage.

La prise. Dans l'eau, l'alite et la bélite forment des silicates de calcium hydratés, un gel mal cristallisé qui se développe à partir de chaque grain et lie les grains entre eux, en libérant de la portlandite (hydroxyde de calcium) et de la chaleur. L'alite donne la résistance des premiers jours, la bélite celle qui vient après la première semaine.

L'eau et la résistance. L'eau en excès laisse des pores, qui affaiblissent le béton. En 1918, Duff Abrams, au Lewis Institute de Chicago, a montré que la résistance dépend surtout du rapport entre l'eau et le ciment ; la plupart des mélanges se situent entre 0,4 et 0,6 en masse. Un béton qui sèche trop tôt cesse de réagir ; dans certains essais, il n'a atteint qu'environ la moitié de la résistance d'un béton maintenu humide.

Comment le fabriquer

Le clinker exige un four industriel, mais le ciment en sac, avant sa date limite d'utilisation, se gâche à la main sur une planche pour un plot de fondation ou une petite dalle de jardin. Tout ce qui porte un bâtiment ou un véhicule demande l'étude d'un ingénieur.

Le coffrage. Pour une dalle, décaissez jusqu'au sol ferme, compactez un hérisson de cailloux et plantez des planches sur chant tout autour, maintenues par des piquets, le dessus de niveau et la face intérieure huilée. Pour un plot, le trou lui-même sert de moule.

Mélanger à sec, puis mouiller peu. Un dosage courant est d'un seau de ciment pour deux de sable à béton et trois de gravier lavé de 20 mm au plus. Retournez le tas sec jusqu'à ce qu'il soit d'un gris uniforme, versez l'eau dans un cratère et ramenez-y à la pelle le mélange sec des bords, peu à peu. Un rapport de 0,5 représente environ 12,5 litres pour un sac de 25 kg, en comptant l'eau que contient déjà le sable humide. Arrêtez quand le mélange est mouillé partout et assez souple pour remplir le coffrage et être serré, tout en tenant sa forme sur la pelle : l'eau en trop le rend plus facile à couler, mais le béton durci plus faible.

Couler, serrer, garder humide. Remplissez le coffrage par couches, piquez chacune avec une tige et tapez les planches pour chasser l'air ; arasez le dessus avec un chevron. Protégez le béton frais du soleil et du vent pendant

L'eau va dans un cratère creusé dans le mélange sec, que l'on rabat depuis les bords.

le travail. Dès que la surface ne marque plus, gardez-la humide sous une bâche ou une toile de jute mouillée pendant au moins 7 jours, plus longtemps par temps frais, et protégez-la du gel.

Tester un cube. Remplissez de la même gâchée un ou deux moules huilés de 10 cm de côté intérieur, en deux couches piquées chacune, et conservez-les sous la même toile humide que la dalle. Un laboratoire d'essais écrase ces cubes sous presse à 7 et 28 jours et donne leur résistance : c'est ainsi qu'on contrôle le béton d'un chantier. Casser un cube à la massette n'apprend pas grand-chose et projette des éclats et de la poussière.

> **Sécurité.** Le ciment frais est très alcalin. Emprisonné contre la peau dans un gant ou une botte, il peut provoquer de graves brûlures chimiques. Portez des gants étanches, des manches longues, le pantalon par-dessus les bottes et des lunettes de protection. Lavez sans tarder la peau souillée ; en cas de projection dans les yeux, rincez à l'eau claire au moins 15 minutes et consultez un médecin. La poudre irrite les poumons : videz les sacs dehors, dos au vent, avec un masque FFP3. Découper du béton durci soulève de la poussière de silice : utilisez une scie à arrosage et un masque FFP3 dont l'ajustement a été vérifié. Un sac pèse 25 kg : soulevez-le jambes fléchies, ou à deux.

Histoire et évolution

La tour de Smeaton à Eddystone, 1759 : des pierres à queue d'aronde dans un mortier qui prend dans l'eau de mer.

En 1756, l'ingénieur anglais John Smeaton, chargé de reconstruire le phare d'Eddystone au large de Plymouth, essaie des chaux pour trouver un mortier qui prenne entre deux marées. Les meilleures viennent d'un calcaire argileux ; il maçonne la tour avec de la chaux hydraulique et de la pouzzolane. En France, en 1817-1818, Louis Vicat montre comment l'argile permet à la chaux de prendre sous l'eau et fabrique une chaux hydraulique artificielle à partir de craie et d'argile, pour un pont à Souillac.

Le 21 octobre 1824, Joseph Aspdin, maçon à Leeds, fait breveter une pierre artificielle « que j'appelle ciment Portland », d'après la pierre claire de Portland, dans le Dorset. Son produit n'était sans doute pas assez cuit pour compter comme ciment Portland aujourd'hui. Dans les années 1840, son fils William et Isaac Charles Johnson, tous deux près de Londres, cuisent le mélange jusqu'au clinker, que leurs prédécesseurs jetaient comme surcuit ; chacun revendiquera la découverte. Cette planche retient 1824, l'année du nom.

Frederick Ransome brevète un four rotatif en 1885. Ses essais anglais échouent, mais un four de ce type chauffé au pétrole fonctionne en Pennsylvanie en 1890, et ces fours remplacent vite les fours fixes.

En 2018, selon Chatham House, le monde produisait plus de 4 milliards de tonnes de ciment par an, et cette fabrication émettait environ 8 % du CO_2 mondial. Plus de la moitié venait du calcaire lui-même, qui libère son gaz carbonique dans le four. Les fabricants remplacent une partie du clinker par du laitier, des cendres volantes, de l'argile calcinée ou du calcaire pour réduire cette part.

Chiffres clés

Température du four
Environ 1 450 °C

Gypse
Environ 5 %, broyé avec le clinker

Dosage courant à la main
1 volume de ciment, 2 de sable, 3 de gravier

Rapport eau/ciment
En général 0,4 à 0,6 en masse

Production mondiale
Plus de 4 milliards de tonnes par an, environ 8 % des émissions mondiales de CO_2 (2018)

Sources

1. About cement · Cement Kilns (D. Moore), history of the British cement industry https://www.cementkilns.co.uk/cement.html
2. Aspdin's 1824 patent · Cement Kilns (D. Moore) https://cementkilns.co.uk/cemkilndoc008.html
3. Early rotary kilns · Cement Kilns (D. Moore) https://cementkilns.co.uk/early_rotary_kilns.html
4. Hard-Headed Man (M. Rinde, 2015) · Science History Institute, Distillations https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/hard-headed-man/
5. Aberthaw Lime and Cement Works, Rhoose (listing record 83144) · Cadw, via British Listed Buildings https://britishlistedbuildings.co.uk/300083144-aberthaw-lime-and-cement-works-rhoose
6. Louis Vicat · École polytechnique https://225.polytechnique.fr/en/225-stories/louis-vicat.html
7. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete (Lehne & Preston, 2018) · Chatham House https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf
8. Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018 (R. M. Andrew, 2019) · Earth System Science Data https://essd.copernicus.org/articles/11/1675/2019/
9. Composition of cement · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/composition%20of%20cement.htm
10. Curing concrete: normal, hot and cold weather · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/curing.html
11. Water-cement ratio of concrete · Gilson Company https://www.globalgilson.com/blog/water-cement-ratio-of-concrete
12. Properties of concrete · University of Memphis, Civil Engineering https://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html
13. Cement · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cement.htm
14. Cutting paving blocks, kerbs and flags · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cutting-paving-blocks-kerbs-and-flags.htm
15. Cement hydration · MC-Bauchemie, MCpedia https://www.mc-bauchemie.com/mcpedia/cement-hydration

Faits vérifiés le 2026-10-14

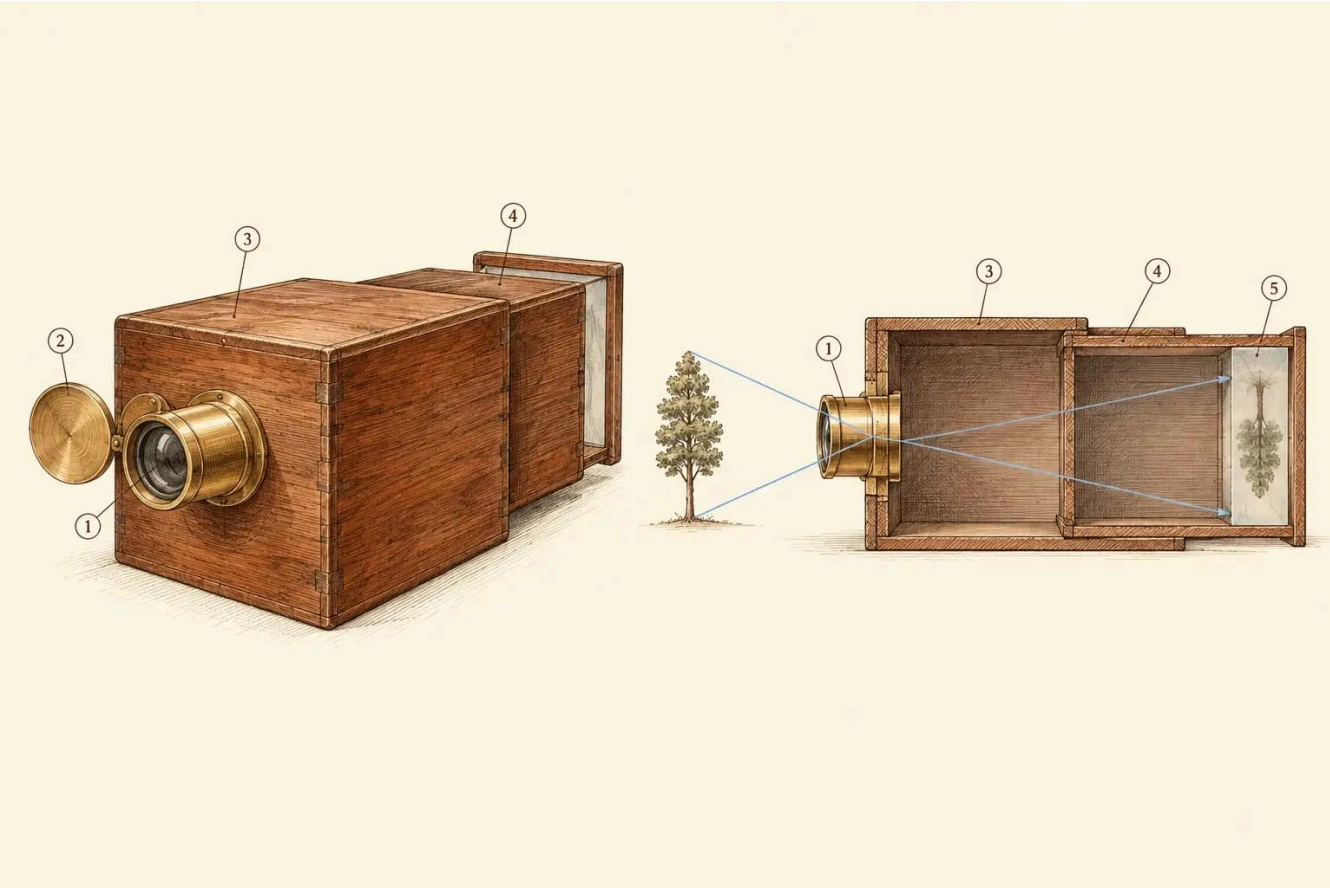
Photographie

La lumière qui laisse une trace

v. 1827 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Verre (p. 134)

Mène à : Radiographie (p. 351)



1 Objectif dans son barillet de laiton 2 Obturateur pivotant en laiton 3 Caisse avant 4 Caisse arrière coulissante 5 Verre dépoli de mise au point

La photographie fixe l'image formée par une lentille sur une surface que la lumière modifie chimiquement. Nicéphore Niépce réalisa en 1826 ou 1827 la plus ancienne photographie prise à la chambre qui nous soit parvenue, et le daguerréotype, rendu public à Paris en 1839, fut le premier procédé vendu au public, appareils et plaques étant en vente en quelques semaines.

Ce que c’est

La photographie enregistre une image faite de lumière. Un objectif projette une petite image de la scène sur une surface enduite d’une substance que la lumière transforme ; après traitement, les clairs et les ombres de la scène restent fixés sur cette surface pour de bon. Le mot signifie « écriture de lumière », et les pionniers parlaient d’images qui se dessinaient toutes seules.

L’appareil de la planche est celui qu’Alphonse Giroux commença à vendre à Paris en 1839 d’après les plans de Louis Daguerre, le premier appareil fabriqué en série pour le public. Ce sont deux caisses de bois, l’une coulissant dans

l'autre. La caisse avant porte un objectif simple dans un barillet de laiton, avec un disque de laiton qui pivote pour commencer la pose. À l'arrière, un verre dépoli montre l'image pour la mise au point ; on le remplace ensuite par un châssis portant la plaque sensible.

Comment ça marche

La lumière de chaque point de la scène traverse l'objectif et se concentre en un point au fond de l'appareil. On obtient une petite copie nette et renversée de la scène, la même image que montrait la chambre noire depuis la Renaissance. En avançant ou en reculant la caisse arrière jusqu'à ce que l'image soit nette sur le verre dépoli, on fait la mise au point.

Les artistes se servaient de chambres noires portatives comme celle-ci bien avant la photographie ; un miroir renvoie l'image sur une vitre où l'on peut la calquer.

Il fallait à la photographie un moyen de garder cette image. Certains composés d'argent noircissent à la lumière, certaines résines y durcissent. Niépce enduisait une plaque d'étain de bitume de Judée dissous dans l'essence de lavande. Là où la lumière frappait, le bitume durcissait ; un solvant éliminait ensuite les parties restées molles, et l'image demeurait, faite de bitume sur le métal nu.

Le daguerréotype employait l'argent. Une plaque de cuivre argentée et polie était sensibilisée aux vapeurs d'iode, exposée plusieurs minutes dans la chambre, développée au-dessus de mercure chauffé, qui se déposait sur les parties touchées par la lumière, puis fixée à l'eau salée ou à l'« hypo ». Le résultat était un positif miroitant, unique et très détaillé. Le calotype de Talbot fonctionnait autrement : il donnait un négatif sur papier dont on pouvait tirer par contact autant d'épreuves positives qu'on voulait, le principe de l'essentiel de la photographie sur film qui a suivi.

Comment la fabriquer

Deux projets simples montrent à la maison les deux moitiés de la photographie : un sténopé forme l'image, et le papier cyanotype enregistre chimiquement la lumière. N'essayez pas le daguerréotype hors d'un laboratoire professionnel équipé d'une hotte aspirante et sans encadrement formé : il emploie du mercure chauffé et de l'iode, tous deux toxiques.

Faire l'appareil. Prendre une boîte étanche à la lumière, une boîte à chaussures par exemple, et en peindre l'intérieur en noir mat. Découper un trou d'environ 2 cm au centre d'une des extrémités et le couvrir d'un morceau de papier d'aluminium fin percé à l'aiguille ; un trou d'environ 0,3 mm convient à une boîte de 10 à 15 cm de profondeur. Couvrir le trou d'un volet de carton noir que l'on peut lever et baisser : c'est l'obturateur.

Regarder l'image. Découper une fenêtre dans l'extrémité opposée et la couvrir de papier calque. Devant une scène bien éclairée, la tête et la boîte sous un tissu sombre, on voit l'image renversée sur le papier, exactement comme dans une chambre noire.

Faire un cyanotype. Le papier déjà enduit, vendu sous le nom de papier solaire et utilisé selon les indications du fabricant, est le plus simple. Le cyanotype, publié par John Herschel en 1842, utilise des sels de fer qui virent au bleu de Prusse sous les ultraviolets. Poser une feuille ou une fougère sur le papier au soleil, sous une vitre, pendant quelques minutes, puis rincer le papier à l'eau et le laisser sécher.

Aller plus loin. Le cyanotype est bien trop lent pour une prise de vue au sténopé : la pose durerait des semaines. Pour photographier avec la boîte elle-même, remplacer le papier calque par un fond étanche à la lumière, sceller

Un photogramme au cyanotype : là où la fougère arrêtait la lumière, le papier est resté blanc.

les bords au ruban adhésif noir et charger en chambre noire du papier photographique ou un film noir et blanc. On le développe et on le fixe ensuite avec les produits ordinaires du laboratoire photo, avec des gants, dans une pièce bien aérée et selon les indications des étiquettes.

> **Sécurité.** Les produits du cyanotype et les bains de laboratoire irritent la peau, les yeux et les voies respiratoires : portez gants et lunettes de protection, tenez-les loin des aliments, des enfants et des animaux, et éliminez-les selon les étiquettes. Si vous préparez vous-même la solution de cyanotype, ne chauffez jamais le ferricyanure de potassium et ne le mélangez jamais à un acide. Ne regardez pas le Soleil à travers le sténopé ni à travers quoi que ce soit. Les procédés anciens qui emploient mercure, cyanure ou éther relèvent uniquement d'un laboratoire professionnel équipé d'une aspiration.

Histoire et évolution

La chambre noire était connue bien avant la photographie, et au XVIIIe siècle les artistes en emportaient de portatives pour calquer des paysages. Les chimistes savaient que les sels d'argent noircissent à la lumière, mais personne ne savait arrêter ce noircissement. Dans sa propriété de Saint-Loup-de-Varennes, en Bourgogne, Nicéphore Niépce obtint en 1816 des images fugitives à la chambre, puis, en 1826 ou 1827, la vue de la fenêtre de son atelier, aujourd'hui la plus ancienne photographie à la chambre conservée, au Harry Ransom Center d'Austin. Sa pose est en général estimée à plusieurs jours, même si certains récits parlent d'environ huit heures.

Niépce s'associa à Louis Daguerre en 1829 et mourut en 1833. Daguerre poursuivit, et le 19 août 1839 son procédé fut exposé en détail devant une séance commune de l'Académie des sciences et de l'Académie des beaux-arts ; l'État français l'avait acheté et le rendit libre d'emploi pour tous, sauf en Angleterre et au pays de Galles, où un brevet fut pris. En Angleterre, Henry Talbot faisait des images sur papier depuis plusieurs années et annonça son premier procédé la même année ; en 1840, il mit au point le négatif calotype, rendu public en 1841.

Un daguerréotype était une plaque argentée unique, gardée sous verre dans un petit étui à charnière.

À partir de 1851, le collodion humide de Frederick Scott Archer mit les négatifs sur verre, plus nets que le papier et bien plus rapides que le daguerréotype, mais il fallait enduire, exposer et développer la plaque en quelques minutes. Dans les années 1880, des usines vendaient des plaques sèches prêtes à l'emploi : George Eastman commença à en fabriquer pour la vente en 1880, et en 1888 il vendit le premier Kodak, une boîte chargée d'un film pour cent vues, que l'on renvoyait tout entière à l'usine pour le développement. Le film couleur se répandit au XXe siècle, et à la fin de ce siècle les capteurs électroniques commencèrent à remplacer la chimie ; devant eux, un objectif forme toujours l'image comme dans la caisse de Giroux.

Chiffres clés

Plus ancienne photographie à la chambre conservée
Niépce, Saint-Loup-de-Varennes, 1826 ou 1827 ; plaque d'étain de 16,7 × 20,3 cm

Daguerréotype rendu public
19 août 1839, Académie des sciences, Paris

Premier Kodak
1888, chargé d'un film pour 100 vues

Sa pose
Sans doute plusieurs jours au soleil (certains récits parlent de 8 heures environ)

Négatif papier (calotype)
Mis au point par Henry Talbot en 1840, rendu public en 1841

Sources

1. The Niépce Heliograph · Harry Ransom Center, University of Texas at Austin https://www.hrc.utexas.edu/niepce-heliograph/
2. Daguerre introduced photography 175 years ago · George Eastman Museum https://www.eastman.org/blog/daguerre-introduced-photography-175-years-ago
3. Giroux Daguerreotype camera · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O1427511/giroux-daguerreotype-camera-camera-daguerre-louis/
4. Hill & Adamson: salted paper prints and the calotype · University of Glasgow Archives & Special Collections https://www.gla.ac.uk/myglasgow/archivespecialcollections/discover/specialcollectionsa-z/hilladamson/saltedpaperprints
5. Collodion glass negatives and the attendant photographic process · Bibliothèque nationale de France https://expositions.bnf.fr/les-nadar/en/the-nadars/collodion-glass-negatives.html
6. Album of cyanotypes of British and Foreign Ferns (Anna Atkins) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co416960
7. Kodak and the Eastman company · Duke University Libraries https://library.duke.edu/rubenstein/scriptorium/eaa/kodak.html
8. Richard Beard (daguerreotype patent in England and Wales) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp40983/richard-beard
9. Historique et description des procédés du daguerréotype et du diorama (Daguerre, 1839) · Internet Archive https://archive.org/details/bub_gb_Ae4TAAAAQAAJ
10. History and practice of photogenic drawing on the true principles of the Daguerréotype (McLean, 1839) · Wellcome Collection, via Internet Archive https://archive.org/details/b29310301
11. Replica of Daguerre-Giroux camera · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8189231/replica-of-daguerre-giroux-camera
12. From Daguerreotype to Digital: the daguerreotype process · The Historic New Orleans Collection https://hnoc.org/virtual-exhibitions/from_daguerreotype_to_digital/daguerreotype-process

Faits vérifiés le 2026-10-12

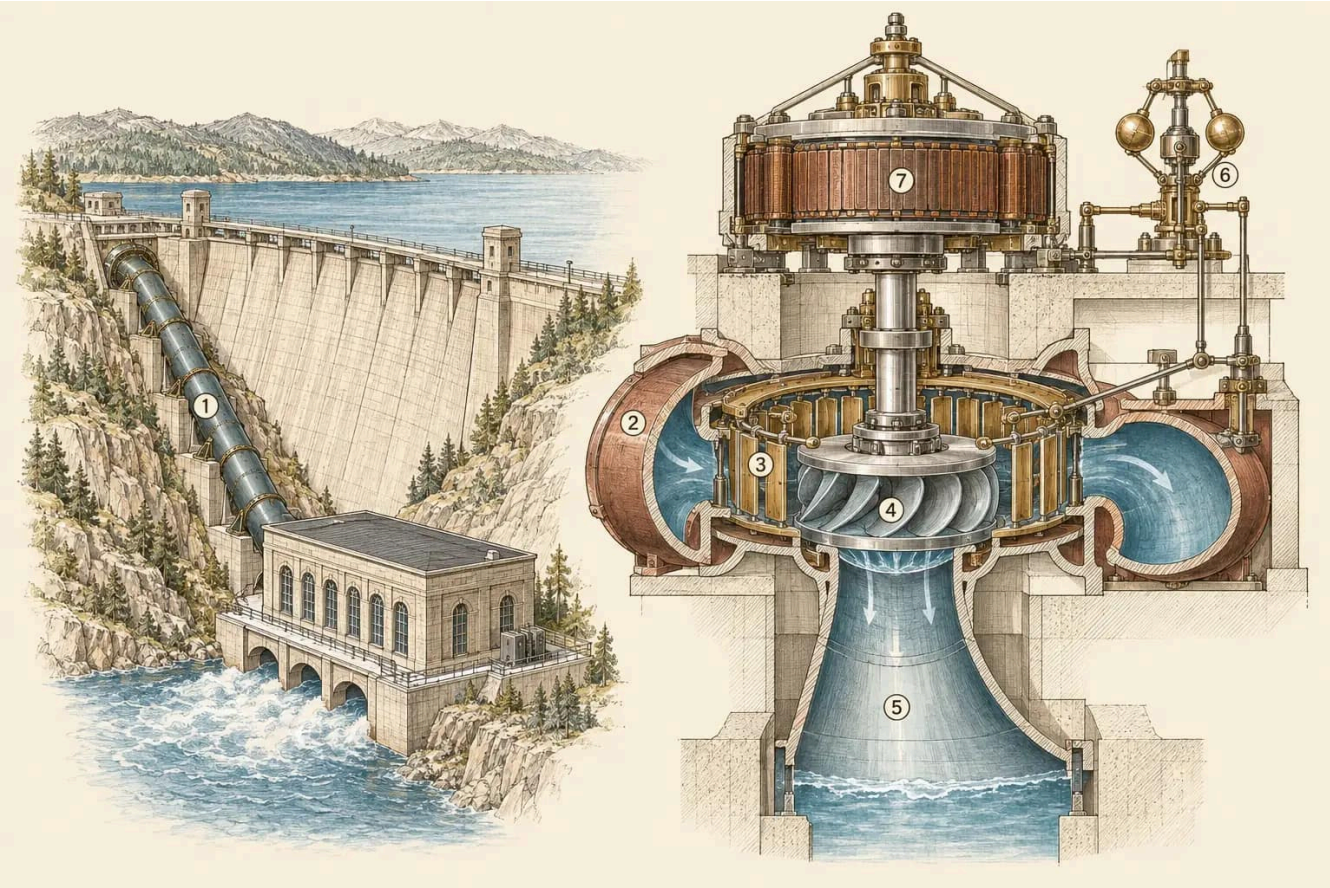
Turbine hydraulique

La chute d'eau changée en électricité

1827 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Roue hydraulique (p. 159), Acier (p. 142), Générateur électrique (p. 276)

Mène à: Aluminium (p. 338)



1 Conduite forcée 2 Bâche spirale 3 Directrices 4 Roue 5 Aspirateur 6 Régulateur 7 Alternateur

Une turbine hydraulique est une roue à aubes que l'eau sous pression fait tourner très vite, dans un carter fermé ou sous un jet. Comme la roue hydraulique, elle tire son énergie d'une chute d'eau, mais dans une machine bien plus petite et plus rapide, et depuis les années 1880 elle entraîne les alternateurs des centrales hydroélectriques.

Ce que c'est

Une turbine hydraulique est une roue garnie d'aubes courbes, que l'eau sous pression fait tourner à grande vitesse. Comme la roue hydraulique, elle puise son énergie dans l'eau qui tombe d'une certaine hauteur. Mais une roue en dessus tourne à l'air libre sous le poids de l'eau de ses augets, une roue en dessous sous la poussée du courant, à quelques tours par minute. La turbine reçoit l'eau par une conduite et tourne des dizaines ou des centaines de fois plus vite: une machine bien plus petite fournit la même puissance.

Sa vitesse lui permet d'entraîner un générateur électrique avec peu ou pas d'engrenages. Presque toutes les centrales hydroélectriques utilisent l'un de trois modèles: la roue Pelton, la turbine Francis ou la turbine Kaplan.

Comment ça marche

Dans une turbine à action, un injecteur transforme toute la pression en un jet rapide et la roue tourne dans l'air. Dans une turbine à réaction, la roue est enfermée et noyée ; la pression baisse entre ses aubes, qui travaillent comme des ailes courbes.

La roue Pelton est une turbine à action, faite pour les hautes chutes et les petits débits. Une arête partage chaque auget en deux : elle fend le jet et renvoie chaque moitié presque à l'opposé. La turbine Francis, à réaction et la plus répandue, couvre les chutes moyennes, d'environ 40 à 600 mètres. La turbine Kaplan, une hélice dont les pales pivotent sur le moyeu, sert pour les basses chutes et les gros débits, au-dessous de 80 mètres environ.

L'arête de chaque auget coupe le jet en deux et renvoie les deux moitiés vers l'arrière.

La planche montre un groupe Francis. L'eau descend par la conduite forcée (1) jusqu'à la bâche spirale (2), qui se rétrécit en s'enroulant autour de la machine pour que l'eau arrive également de tous les côtés. Les directrices (3) la mettent en rotation et règlent le débit. Elle traverse la roue (4) de l'extérieur vers le centre, puis repart vers le bas par l'aspirateur (5), un conduit évasé qui la ralentit peu à peu et récupère une partie de l'énergie qui lui reste.

La puissance disponible vaut $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$: masse volumique de l'eau ρ (environ 1 000 kg/m^3), pesanteur g (9,81 m/s^2), débit Q en m^3/s, hauteur de chute nette H en mètres et rendement η. Avec 100 mètres de chute, 0,2 m^3/s et 85 % pour la turbine et l'alternateur ensemble, $P = 1\,000 \times 9{,}81 \times 0{,}2 \times 100 \times 0{,}85 \approx 167$ kW. Une grande turbine Francis dépasse à elle seule 90 %.

L'alternateur (7) est calé sur le même arbre, et sa fréquence suit sa vitesse. Le régulateur (6) maintient cette vitesse en fermant les directrices quand l'arbre accélère et en les ouvrant quand il ralentit. Il doit agir progressivement : fermer brusquement une longue conduite provoque un coup de bélier, une surpression capable de la faire éclater. À 100 tours par minute, un alternateur doit avoir 60 pôles pour donner 50 hertz.

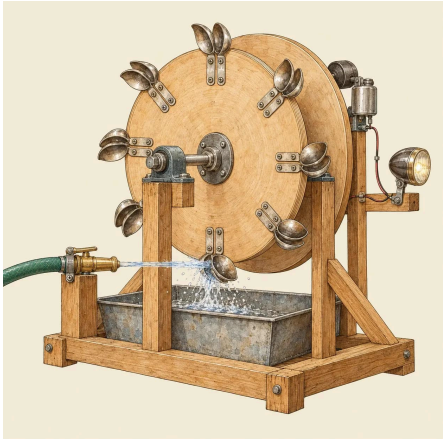
Comment la construire

Une roue de cuillères alimentée par un tuyau d'arrosage depuis un ruisseau peut allumer une lampe de vélo. Demandez d'abord l'accord du propriétaire et de l'administration chargée de l'eau : dans la plupart des pays, prélever l'eau d'un cours d'eau demande une autorisation.

Mesurer la chute. Déroulez un tuyau de la prise d'eau jusqu'à l'emplacement de la roue, tenez son extrémité haute sous l'eau et laissez-le couler jusqu'à ce qu'il ne sorte plus d'air. Fermez ensuite l'extrémité basse par un manomètre : chaque bar de pression statique correspond à environ 10,2 mètres de chute. Un niveau de chantier et une mire, déplacés vers l'aval d'un repère à l'autre, permettent de vérifier.

Mesurer le débit. Pour un filet d'eau de moins de 5 litres par seconde environ, faites-le passer par un tuyau dans un petit barrage de terre et chronométrez le remplissage d'un seau. Pour un ruisseau plus fort, chronométrez un flotteur sur 10 mètres, multipliez sa vitesse par 0,85 environ, puis par la largeur et la profondeur moyenne.

Calculer la puissance. Avec 8 mètres de chute et 0,3 litre par seconde dans le tuyau, l'eau porte $P = 1\,000 \times 9{,}81 \times 0{,}0003 \times 8 \approx 24$ W. Le tuyau et la buse perdent une partie de la chute, et une roue et une dynamo artisanales ne transforment en électricité qu'une part modeste du reste. Comptez sur quelques watts, peut-être assez pour une dynamo de vélo de 3 watts, et mesurez ce que vous obtenez vraiment. Laissez l'essentiel du ruisseau aux poissons.



Deux cuillères côte à côte forment un auget double rudimentaire.

Faire la roue. Fixez un disque de contreplaqué d'environ 30 cm de diamètre sur un axe en acier tournant dans deux paliers. Vissez sur son pourtour huit à dix paires de cuillères à soupe, côte à côte, dont les creux dépassent du bord, tournés vers le jet, et se rejoignent en une arête.

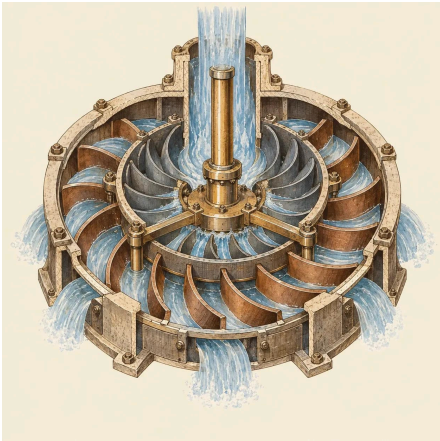
Orienter le jet. Fixez une buse à jet au bout du tuyau et bridez-la pour que le jet frappe les arêtes tangentiellement. Sans pertes, il sortirait à 12,5 m/s ; avec les frottements du tuyau, 10 m/s environ est plus probable. Les cuillères donnent le meilleur à la moitié de la vitesse du jet, mesurée sur le cercle où il les frappe : environ 270 tours par minute si ce cercle mesure 35 cm de diamètre.

Ajouter la dynamo. Montez sur l'axe un second disque lisse d'environ 35 cm et appuyez contre son bord le galet d'une dynamo bouteille. À 270 tours par minute, ce bord se déplace comme le pneu d'un vélo à 18 km/h environ. Reliez-la à une lampe de vélo par deux fils isolés : sur un vélo, le cadre sert de retour au courant ; ici, il faut un fil. Renvoyez au ruisseau l'eau qui sort de la roue.

> **Sécurité.** Ne travaillez jamais seul au bord d'un ruisseau et n'y entrez pas quand il est en crue : une eau rapide et froide renverse et noie. Un tuyau qui descend de 8 mètres contient presque un bar de pression. Ouvrez et fermez lentement les longues conduites, car un arrêt brusque provoque un coup de bélier qui fait sauter les raccords. Gardez les yeux et les doigts hors du jet, protégez la roue par un carter et coupez l'eau avant de la toucher. Isolez chaque connexion et gardez aussi les doigts loin du galet de la dynamo. Les générateurs plus gros atteignent des tensions dangereuses : n'en branchez jamais un sur l'installation électrique d'un bâtiment.

Histoire et évolutions

En 1825, Claude Burdin, professeur à l'École des mines de Saint-Étienne, construit à Pontgibaud une turbine d'un rendement de 67 %. Son ancien élève Benoît Fourneyron en fait une machine industrielle : en avril 1827, aux forges de Pont-sur-l'Ognon, il installe une turbine de six chevaux sous une chute de 1,40 mètre.



Dans la turbine de Fourneyron, l'eau va du centre vers l'extérieur, des directrices fixes vers la couronne mobile.

En 1849, à Lowell, dans le Massachusetts, James B. Francis construit une turbine centripète perfectionnée et publie ses essais en 1855. Dans les régions aurifères de Californie, Lester Pelton bâtit sa première roue en 1878 et fait breveter l'auget double en 1880.

En 1878, Lord Armstrong éclaire sa maison de Cragside, dans le Northumberland, avec des lampes à arc alimentées par l'eau des lacs du domaine. À Appleton, dans le Wisconsin, une centrale fournit du courant continu à partir du 30 septembre 1882. En 1895, la centrale Adams des chutes du Niagara met en marche des alternateurs Westinghouse de 5 000 chevaux, en courant alternatif selon le système de Nikola Tesla ; à partir de novembre 1896, son courant atteint Buffalo. Viktor Kaplan dépose en 1913 son brevet de pales de roue orientables, et la première turbine Kaplan industrielle tourne à Velm, en Autriche, en 1919.

Le monde comptait 1 412 GW de puissance hydroélectrique en 2023. Le barrage des Trois-Gorges, en Chine, atteint à lui seul 22,5 GW, et environ 1,3 million de personnes ont été déplacées pour sa retenue. Les barrages bloquent les

poissons migrateurs et retiennent les sédiments : selon une étude publiée en 2019, seuls 37 % des 246 plus longs cours d'eau du monde coulaient encore librement sur toute leur longueur.

Chiffres clés

Première turbine industrielle
Benoît Fourneyron, avril 1827, Pont-sur-l'Ognon (Haute-Saône) : 6 ch sous 1,40 m de chute

Augets doubles de Pelton
Brevet américain 233 692, 26 octobre 1880

Puissance hydroélectrique mondiale
1 412 GW en 2023

Puissance disponible
$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$

Plus grande centrale
Barrage des Trois-Gorges, Chine : 22,5 GW

Sources

1. Usine de transformation des métaux dite forges de Pont-sur-l'Ognon (IA70000081) · Ministère de la Culture, base Mérimée https://pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/IA70000081
2. Instrument de démonstration en mécanique des fluides n° 5 : tourniquet hydraulique · Inventaire du patrimoine, Région Bourgogne-Franche-Comté https://patrimoine.bourgognefranchecomte.fr/dossier/pdf/IM21008546
3. Boyden Hydraulic Turbines (landmark brochure) · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/ResourceFiles/AboutASME/Who%20We%20Are/Engineering%20History/Landmarks/5-Boyden-Hydraulic-Turbines-1871.pdf
4. #157 Pelton Waterwheel Collection · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/157-pelton-waterwheel-collection
5. US 233,692: Water-wheel (L. A. Pelton, 26 October 1880) · United States Patent Office, via Google Patents https://patents.google.com/patent/US233692A/en
6. 100 Jahre Kaplan-Turbine (H. Jaberg, WasserWirtschaft 6/2014) · Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, TU Graz https://www.hfm.tugraz.at/fileadmin/user_upload/pics/news/2020/201406_Helmut_Jaberg_Viktor-Kaplan-Kaplanturbine.pdf
7. History of Cragside · National Trust https://www.nationaltrust.org.uk/visit/north-east/cragside/history-of-cragside
8. Milestones: Vulcan Street Plant, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Vulcan_Street_Plant,_1882
9. Milestones: Adams Hydroelectric Generating Plant, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Adams_Hydroelectric_Generating_Plant,_1895
10. Niagara Power Houses · Edison Tech Center https://edisontechcenter.org/niagara/
11. Types of Hydropower Turbines · U.S. Department of Energy, Water Power Technologies Office https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines
12. Turbine types · Electrical and Mechanical Services Department, Hong Kong SAR Government https://re.emsd.gov.hk/english/other/hydroelectric/Turbine_types.html
13. Glossary of Hydropower Terms · U.S. Bureau of Reclamation https://www.usbr.gov/power/edu/Glossary%20of%20Hydropower%20Terms.pdf
14. Hydraulic head · Energy Education, University of Calgary https://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydraulic_head
15. Water (FAO Training Series), chapter 3: Estimates of water flow · FAO https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705e/x6705e03.htm
16. 2024 World Hydropower Outlook · International Hydropower Association https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook
17. Thousands being moved from China's Three Gorges, again (Reuters) · Eco-Business https://www.eco-business.com/news/thousands-being-moved-from-chinas-three-gorges-again/
18. New study: just one-third of the world's longest rivers remain free-flowing · McGill University Reporter (on Grill et al., Nature 569, 2019) https://reporter.mcgill.ca/new-study-just-one-third-of-the-worlds-longest-rivers-remain-free-flowing/
19. Fluid Machinery, lectures 26–27: Pelton wheel · NPTEL, Indian Institute of Technology Kanpur https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104117/chapter_7/7_5.html
20. Pelton Impulse Water Turbine Design Formulas · Engineers Edge https://www.engineersedge.com/hydraulic/pelton_impulse_water_turbine_15629.htm

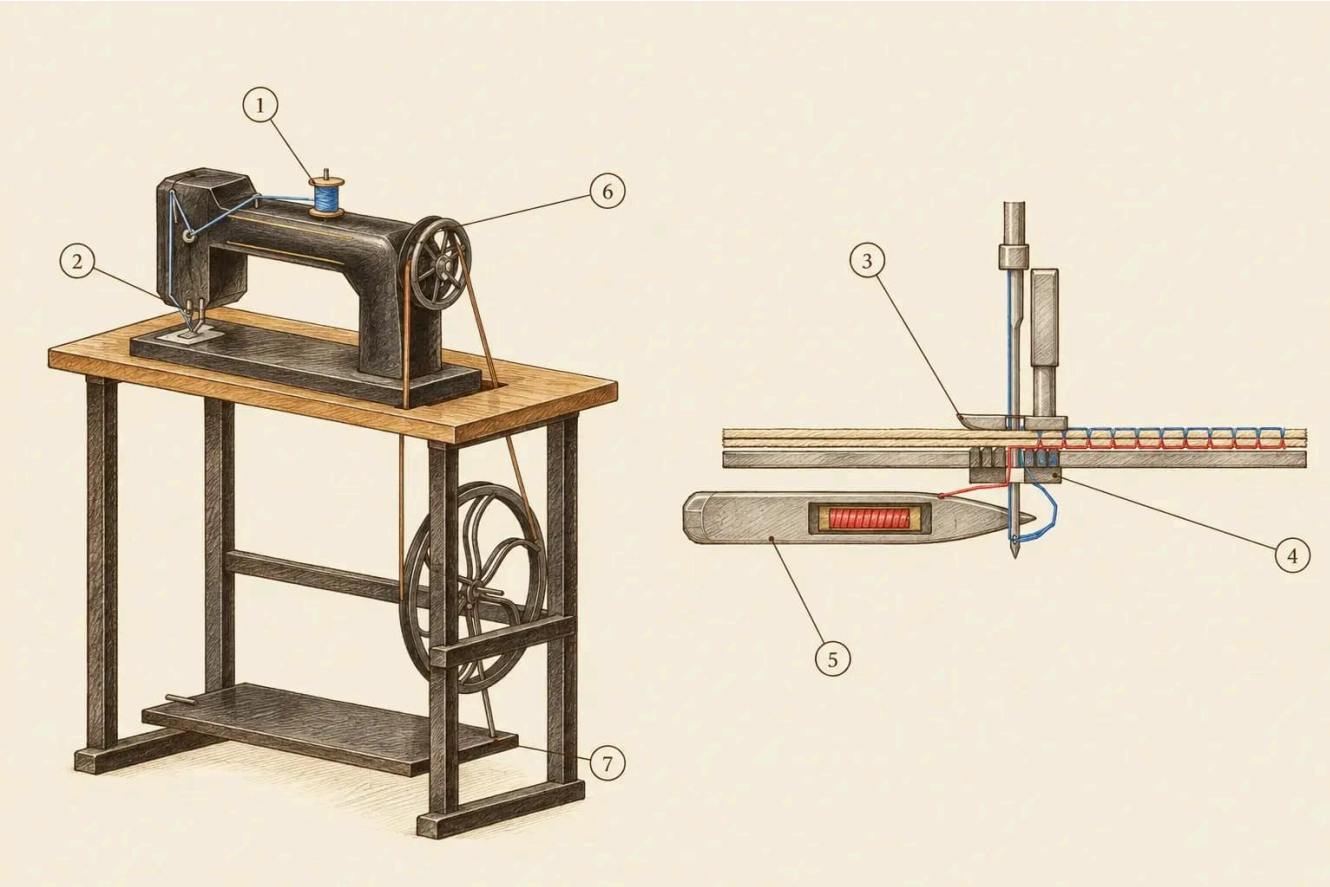
Faits vérifiés le 2026-10-14

Machine à coudre

Mille points à la minute

1830 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Engrenages (p. 155), Métallurgie du fer (p. 138), Tissage (p. 44), Acier (p. 142)



1 Bobine de fil supérieur 2 Barre à aiguille et aiguille 3 Pied presseur 4 Griffe d'entraînement 5 Navette et canette 6 Volant à main 7 Pédale et volant d'inertie

Une machine à coudre assemble le tissu par des points formés mécaniquement, le plus souvent en nouant un fil supérieur, porté par une aiguille dont le chas est près de la pointe, autour d'un fil inférieur logé dans une navette ou une boîte à canette. La machine à point de chaînette de Barthélemy Thimonnier, en 1830, fut la première employée en atelier; le brevet du point noué d'Elias Howe en 1846 et la machine d'Isaac Singer en 1851 en firent un outil de l'industrie et du foyer.

Ce que c'est

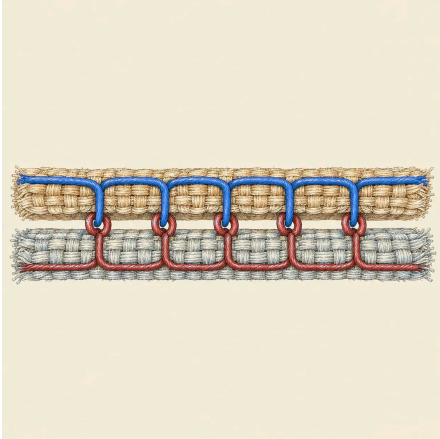
Une machine à coudre fait passer une aiguille enfilée à travers le tissu, encore et encore, et à chaque passage elle noue le fil pour que les points tiennent. Son mécanisme répète quelques mouvements: l'aiguille descend et remonte, un crochet ou une navette attrape le fil sous le tissu, et l'étoffe avance d'un point.

La plupart des machines font un point noué, dit point de navette: deux fils, l'un venu du dessus et l'autre du dessous, s'enlacent au milieu de l'épaisseur du tissu. La machine type des années 1860 à 1880, celle qui fit entrer

la couture mécanique dans les ateliers et les maisons, était une tête en fonte sur un bâti à pédale, avec une aiguille droite et une navette en forme de barque.

Comment ça marche

L'aiguille d'une machine à coudre a son chas près de la pointe, à l'inverse d'une aiguille à main, et on ne la lâche jamais : elle reste serrée dans sa barre pendant que sa pointe et son chas traversent le tissu. Elle entraîne le fil supérieur à travers l'étoffe et le trou de la plaque à aiguille. Quand elle commence à remonter, le frottement retient un peu de fil sous le tissu et une petite boucle s'ouvre à côté de l'aiguille.



Dans un point noué achevé, le fil supérieur et le fil inférieur s'enlacent entre les épaisseurs de tissu.

La navette pointue passe à cet instant dans la boucle, en emportant une petite canette de fil inférieur. La boucle glisse autour de la navette et s'échappe par l'arrière : le fil supérieur entoure maintenant le fil inférieur. Le releveur de fil, à l'avant de la machine, tire alors le fil supérieur, et le croisement remonte au milieu du tissu. Des ressorts de tension sur les deux fils règlent sa position : si un fil est trop serré, le nœud se voit sur une face.

La navette en barque contient la canette du fil inférieur ; le fil sort par un trou sur son flanc, où un petit ressort, non dessiné ici, règle sa tension.

Entre deux points, le tissu doit avancer. Le pied presseur le maintient contre une petite barrette dentée, la griffe, qui sort par des fentes de la plaque, pousse l'étoffe d'une longueur de point puis redescend. Le même arbre principal, qui commande la barre à aiguille par une manivelle, entraîne par-dessous la navette et la griffe, si bien que les trois restent synchronisés. Sur une machine à pédale, les pieds font basculer une large pédale de fonte, une bielle fait tourner un lourd volant, et une courroie de cuir transmet le mouvement jusqu'au volant à main, sur le bras.

Le point de chaînette à un fil, plus ancien, se passe de fil inférieur. Dans la machine de Thimonnier, une aiguille à crochet tirait chaque nouvelle boucle à travers la précédente ; les machines à chaînette à un fil plus récentes utilisent une aiguille à chas et, dessous, un boucleur qui retient chaque boucle pour le point suivant. Ce point est rapide, mais si l'on tire sur le bout de fil à la fin de la couture, toute la couture peut se défaire.

Comment la construire

Une vraie machine à coudre demande des aiguilles trempées, des cames et des pièces ajustées, faites en atelier de mécanique. Un grand modèle sur un simple cadre montre comment les deux fils d'un point noué s'enlacent.

Faire le cadre. Tendez un morceau de toile de jute à trame lâche sur un cadre ou un tambour à broder et fixez-le à bonne hauteur, en laissant de la place pour passer la main dessous.

Faire l'aiguille. Prenez un tourillon de bois d'environ 30 cm et 8 mm de diamètre, taillez un bout en pointe émoussée au taille-crayon et percez un trou de 4 mm à 1 cm environ de la pointe. Enfilez dans ce chas un gros fil de laine d'une couleur, en laissant une queue d'environ 15 cm.

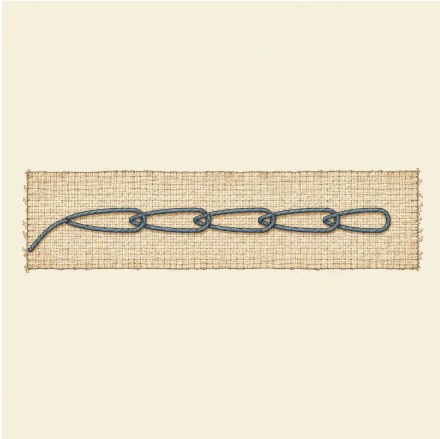
Faire la navette. Enroulez environ deux mètres de fil de laine d'une autre couleur autour d'une pince à linge ou d'une petite navette de bois. Avant le premier point, fixez le bout de chaque fil au dos du cadre avec du ruban adhésif pour qu'il ne puisse pas filer.

Coudre. Une personne enfonce l'aiguille dans la toile jusqu'à ce que le chas soit bien au-dessous, puis la remonte d'un centimètre en retenant le fil au-dessus de la toile, pour qu'une boucle s'ouvre dessous. Une seconde personne passe la navette dans la boucle, d'avant en arrière, en déroulant du fil au besoin. Remontez l'aiguille et serrez les deux fils pour que le croisement s'enfonce dans la trame. Faites le point suivant environ 2 cm plus loin sur la toile et recommencez. Retournez le cadre : les deux couleurs sont liées entre les deux faces.

> **Sécurité.** Tenez la pièce dans un étau ou avec un serre-joint pour percer et gardez les doigts loin du foret. Sur une vraie machine à coudre, éloignez les doigts de l'aiguille en mouvement, ne glissez jamais la main sous le pied presseur pendant que la machine tourne, et éteignez et débranchez une machine électrique avant de l'enfiler, de changer l'aiguille ou d'enlever les peluches.

Histoire et évolution

Plusieurs inventeurs déposèrent des brevets de dispositifs à coudre dès la fin du XVIIIe siècle, mais la première machine employée en production fut celle du tailleur français Barthélemy Thimonnier, brevetée en 1830. Elle faisait un point de chaînette avec une aiguille à crochet, à la manière de la broderie au tambour. Il eut bientôt 80 machines qui cousaient des habits militaires dans un atelier parisien. Une foule de tailleurs, craignant pour leur métier, y entra et les détruisit. La plupart des récits datent l'attaque de 1831 ; certains la placent dix ans plus tard. Thimonnier mourut en 1857.



Dans le point de chaînette, chaque boucle n'est retenue que par la suivante. Rien ne retient la dernière : en tirant le fil de ce côté, on défait la couture boucle après boucle.

Aux États-Unis, Elias Howe obtint le 10 septembre 1846 le brevet n° 4 750 pour une machine à point noué. Elle utilisait une aiguille courbe à chas près de la pointe et une navette portant le second fil, et il affirmait qu'elle cousait 250 points à la minute. En 1851, Isaac Merritt Singer fit breveter une machine dont l'aiguille droite montait et descendait au-dessus d'une table plate, la disposition encore employée aujourd'hui. Les brevets se recoupaient et les fabricants se poursuivirent en justice jusqu'en 1856, quand Howe, Singer, Wheeler and Wilson et Grover and Baker mirent leurs brevets en commun dans la Sewing Machine Combination ; Howe touchait une redevance sur chaque machine vendue.

Edward Clark, l'associé de Singer, vendit les machines à crédit et par des agents qui faisaient du porte-à-porte. En 1875, environ 250 000 machines Singer furent placées sous licence, contre quelque 104 000 pour son premier concurrent, Wheeler and Wilson. Des crochets rotatifs prirent la place de la navette sur les machines rapides, on monta des moteurs électriques à partir de la fin du XIXe siècle, et les usines de confection en vinrent à dépendre de rangées de machines motorisées cousant plusieurs milliers de points à la minute.

Chiffres clés

Machine de Thimonnier

Brevetée en France en 1830 ; 80 machines cousaient des uniformes à Paris avant d'être détruites par des tailleurs

Brevet du point noué de Howe

Brevet américain n° 4 750, 10 septembre 1846 ; 250 points à la minute selon lui

Brevet de Singer

12 août 1851 : aiguille droite à mouvement vertical au-dessus d'une table plate

Sewing Machine Combination

1856, premier pool de brevets de l'industrie américaine

Machines Singer sous licence en 1875

Environ 250 000 machines sous licence, plus du double de son premier concurrent

Sources

1. Copy of Thimonnier's chain-stitch sewing machine, 1830 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44718/copy-of-thimonniers-chain-stitch-sewing-machine-1830-sewing-machines
2. Sewing Machine (Designs for Democracy) · U.S. National Archives https://www.archives.gov/exhibits/designs_for_democracy/symbols_and_substance/articles/sewing_machine_1.html
3. Isaac M. Singer (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/isaac-m-singer/
4. 'New Family' sewing machine (model 12/12k) · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O1351206
5. The Invention of the Sewing Machine (Grace Rogers Cooper, Smithsonian Institution, 1968) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/files/32677/32677-h/32677-h.htm
6. Singer New Family sewing machine, 1865 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44768/singer-new-family-sewing-machine-1865-1
7. Instructions for using and adjusting the Singer 12K sewing machine · ISMACS International (Needlebar archive) https://ismacs.net/needlebar/main/manuals/singer12k/
8. Howe Machine Company instruction book · ISMACS International (Needlebar archive) https://ismacs.net/needlebar/main/manuals/howe/index4.html
9. Singer oscillating shuttle machines: retiming · Singer Sewing Info https://www.singersewinginfo.co.uk/28timing
10. Needles for domestic Singer sewing machines · Singer Sewing Info https://www.singersewinginfo.co.uk/needles

Faits vérifiés le 2026-10-12

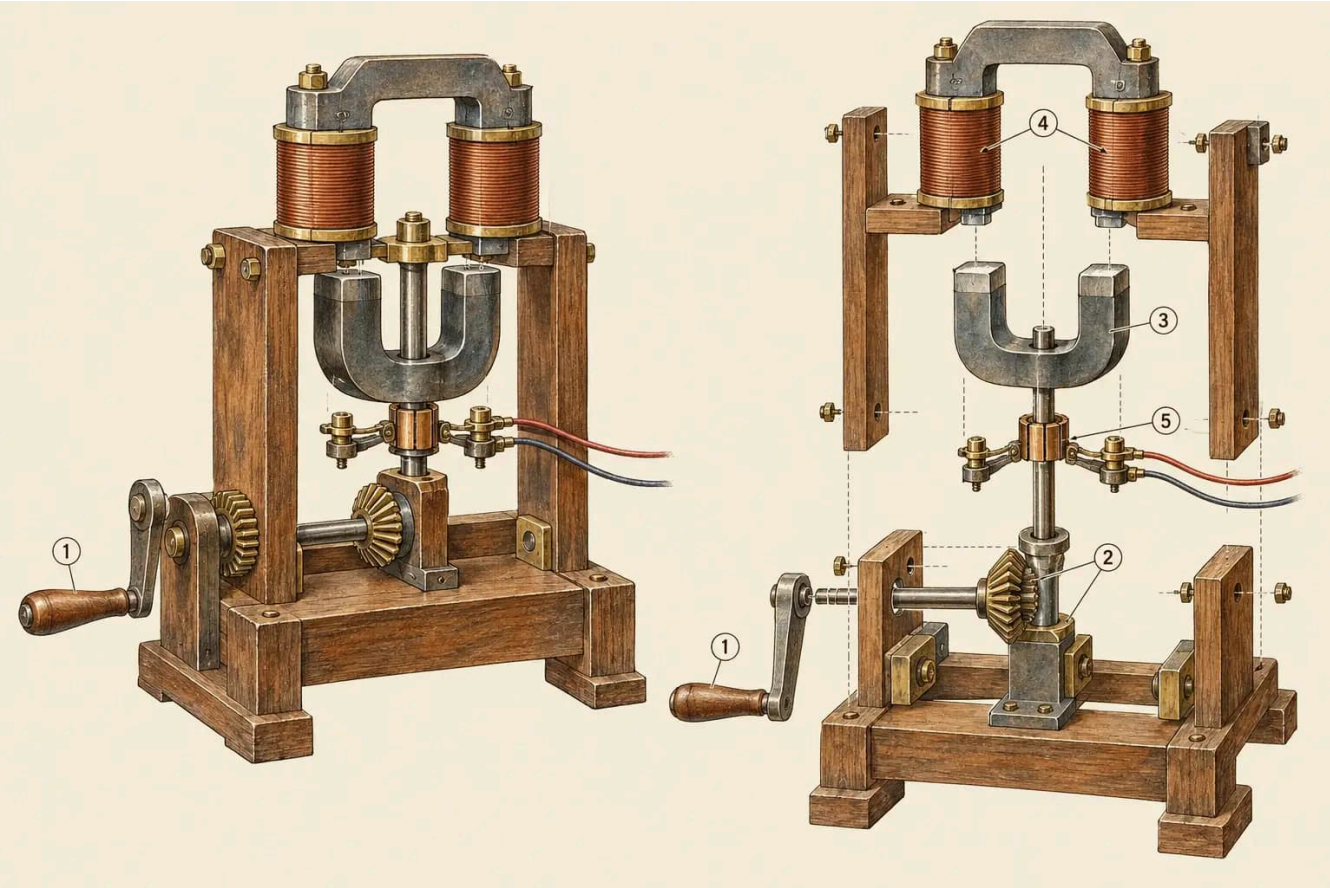
Générateur électrique

Le mouvement changé en courant

1831 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Pile électrique (p. 242), Métallurgie du fer (p. 138)

Mène à : Aluminium (p. 338), Accumulateur au plomb (p. 306), Ampoule à incandescence (p. 324), Radio (p. 347), Turbine à vapeur (p. 328), Transformateur (p. 333), Turbine hydraulique (p. 267), Éolienne (p. 342), Radiographie (p. 351)



1 Manivelle 2 Engrenages coniques 3 Aimant en fer à cheval 4 Bobines sur noyaux de fer 5 Commutateur et balais

Un générateur électrique transforme un mouvement mécanique en courant en faisant défiler un aimant et une bobine de fil l'un devant l'autre. Michael Faraday en découvrit le principe en 1831, et presque toute l'électricité consommée aujourd'hui sort encore de machines qui l'appliquent.

Ce que c'est

Un générateur transforme un travail mécanique, celui d'une manivelle, d'une roue à aubes, d'une machine à vapeur ou d'une turbine, en courant électrique. Il lui faut un aimant, une bobine de fil de cuivre et un moyen de faire passer l'un devant l'autre.

Les piles coûtent cher et s'épuisent ; les générateurs ont permis de produire l'électricité en masse, avec du charbon ou une chute d'eau. Centrales, alternateurs de voiture, dynamos de vélo et éoliennes fonctionnent tous ainsi.

Comment ça marche

Le principe est l'induction électromagnétique. Quand le flux magnétique à travers une bobine (la quantité de champ qui la traverse) varie, une tension apparaît entre ses extrémités. Un flux constant ne donne aucune tension. Plus le flux varie vite et plus la bobine compte de spires, plus la tension est élevée.

L'anneau d'induction de Faraday : l'aiguille ne bougeait qu'à l'instant où l'on branchait ou débranchait la pile.

Dans la machine de la planche, construite par Hippolyte Pixii en 1832, une manivelle entraîne un arbre vertical par deux engrenages coniques. L'arbre porte un aimant permanent en fer à cheval dont les pôles passent juste sous deux bobines fixes à noyau de fer. Quand un pôle nord arrive sous une bobine, le flux qui la traverse augmente et le courant circule dans un sens. Quand ce pôle s'éloigne, le flux diminue et le courant s'inverse. Le pôle sud reprend le cycle, champ inversé : la machine nue produit donc du courant alternatif.

Pixii y ajouta un commutateur, suggéré par André-Marie Ampère : un inverseur sur l'arbre qui permute les sorties à chaque demi-tour, quand le courant change de sens. On obtient un courant continu pulsé, capable de charger des accumulateurs ou de décomposer l'eau.

Le disque de Faraday, en 1831, donnait un faible courant continu ininterrompu.

Dès que le courant passe, les bobines deviennent des aimants et freinent le mouvement : la manivelle durcit quand on branche une lampe. L'énergie électrique recueillie est le travail fourni par la main ou le moteur, moins les pertes par frottement et échauffement.

Au XIXe siècle, les aimants permanents étaient faibles ; les grosses machines utilisèrent donc des électroaimants. Dans une dynamo auto-excitée, une partie du courant de la machine les alimente. Le léger magnétisme resté dans le fer fait naître un petit courant, qui renforce le champ, qui augmente le courant, jusqu'à ce que la tension se stabilise à un niveau fixé par la vitesse et par la saturation du fer. Un alternateur de centrale moderne fait tourner un électroaimant dans des enroulements fixes ; à deux pôles, il tourne à 3 000 tours par minute pour du 50 hertz, ou à 3 600 pour du 60 hertz.

Comment le construire

Un petit alternateur à manivelle peut allumer une LED ou une ampoule de lampe de poche.

Fabriquer le rotor. Découper un disque de contreplaqué ou de bois dur d'environ 15 cm de diamètre. Coller sur une de ses faces huit aimants plats ronds (ferrite ou néodyme), régulièrement espacés près du bord, de sorte que les faces extérieures alternent nord, sud, nord, sud. Les ligaturer à la ficelle : un aimant mal fixé s'envole à grande vitesse.

Bobiner. Enrouler huit bobines plates de fil de cuivre émaillé de 0,3 à 0,5 mm, quelques centaines de spires chacune, toutes dans le même sens, sur un gabarit de la taille d'un aimant.

Monter le stator. Fixer les bobines sur une planche parallèle au rotor, chacune face à un aimant, à quelques millimètres. Deux bobines voisines font toujours face à des pôles opposés : les relier en série en inversant une

bobine sur deux, pour que leurs tensions s'ajoutent.

Multiplier la vitesse. Une courroie passant d'une grande poulie sur la manivelle à une petite sur l'arbre du rotor multiplie la vitesse par quatre ou cinq.

Redresser et essayer. La sortie est alternative. Un pont de quatre diodes la transforme en courant continu pulsé. Alimenter une LED depuis le pont à travers une résistance d'un kilohm et d'un demi-watt, qui maintient le courant sous 20 milliampères environ tant que la tension de sortie reste inférieure à 20 volts environ ; vérifier la tension au multimètre avant de tourner vite. Charger une batterie demande un vrai régulateur adapté à son type, pas seulement des diodes.

Faute d'aimants du commerce, on aimante des barres d'acier dans une bobine alimentée quelques secondes par une batterie, avec une ampoule de voiture en série pour limiter le courant. Une dynamo auto-excitée, une fois amorcée par le magnétisme résiduel, se passe de tout aimant permanent.

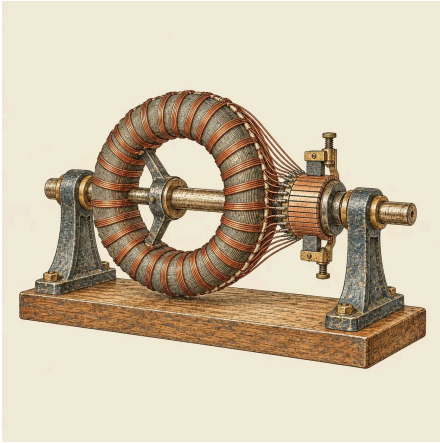
> **Sécurité.** Les pièces tournantes happent doigts, cheveux et vêtements amples : protéger la courroie et le rotor. Les aimants au néodyme se collent assez violemment pour pincer la peau et se briser ; les tenir loin des stimulateurs cardiaques. La tension augmente avec la vitesse et devient dangereuse sur les grosses machines. Ne jamais raccorder un générateur artisanal ou portatif à l'installation d'un bâtiment ni au réseau : le courant renvoyé sur les lignes peut tuer les agents qui y travaillent, et seul un électricien posant un inverseur de source adapté peut faire ce branchement.

Histoire et évolutions

En 1820, Hans Christian Ørsted montra qu'un courant électrique fait dévier l'aiguille d'une boussole. Michael Faraday en conclut que le magnétisme devait, à son tour, pouvoir produire de l'électricité. Le 29 août 1831, à la Royal Institution de Londres, il enroula deux bobines sur un anneau de fer et vit l'aiguille d'un galvanomètre sauter chaque fois qu'il branchait ou débranchait une pile sur l'autre bobine. À l'automne, il fit tourner un disque de cuivre entre les pôles d'un aimant et en tira un courant continu. Il présenta ses résultats à la Royal Society le 24 novembre 1831.

Moins d'un an plus tard, Pixii, fabricant d'instruments parisien, construisit la machine à manivelle de la planche. En 1866 et 1867, Samuel Alfred Varley, Werner Siemens et Charles Wheatstone annoncèrent chacun la dynamo auto-excitée, et Siemens baptisa le principe « dynamo-électrique ». Vers 1870, Zénobe Gramme construisit un induit en anneau qui donnait un courant régulier.

Le 4 septembre 1882, la centrale new-yorkaise de Thomas Edison, à Pearl Street, commença à livrer du courant continu à 110 volts, produit par six dynamos « Jumbo » mues à la vapeur. Le courant alternatif l'emporta ensuite pour les longues distances, car les transformateurs permettent d'en élever la tension ; en 1891, une ligne triphasée transporta l'énergie sur 175 km, de Lauffen am Neckar à Francfort. Charles Parsons accoupla une dynamo à une turbine à vapeur en 1884, et depuis, la plupart des grandes centrales utilisent des générateurs entraînés par des turbines. En 1975, le premier de trois groupes de 600 MW démarra au barrage de Grand Coulee, avec un stator de 22 mètres de diamètre.



L'anneau de Gramme répartit le bobinage tout autour de l'induit, si bien que le courant ne pulse presque plus.

Chiffres clés

Découverte de l'induction
29 août 1831, par Michael Faraday

Machine magnéto-électrique de Pixii
Paris, 1832

Dynamo auto-excitée
1866-1867 (Varley, Siemens, Wheatstone)

Centrale de Pearl Street, 1882
Six dynamos d'environ 100 kW, courant continu 110 V

Sources

1. Michael Faraday · The Institution of Engineering and Technology (IET) Archives https://www.theiet.org/membership/library-archives/the-iet-archives/biographies/michael-faraday/
2. Magnetoelectric machine by Pixii · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/MagnetoelectricMachineByPixii.html
3. Chronik: Generatoren · VDE Verband der Elektrotechnik https://www.vde.com/de/geschichte/chronik/generatoren
4. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station

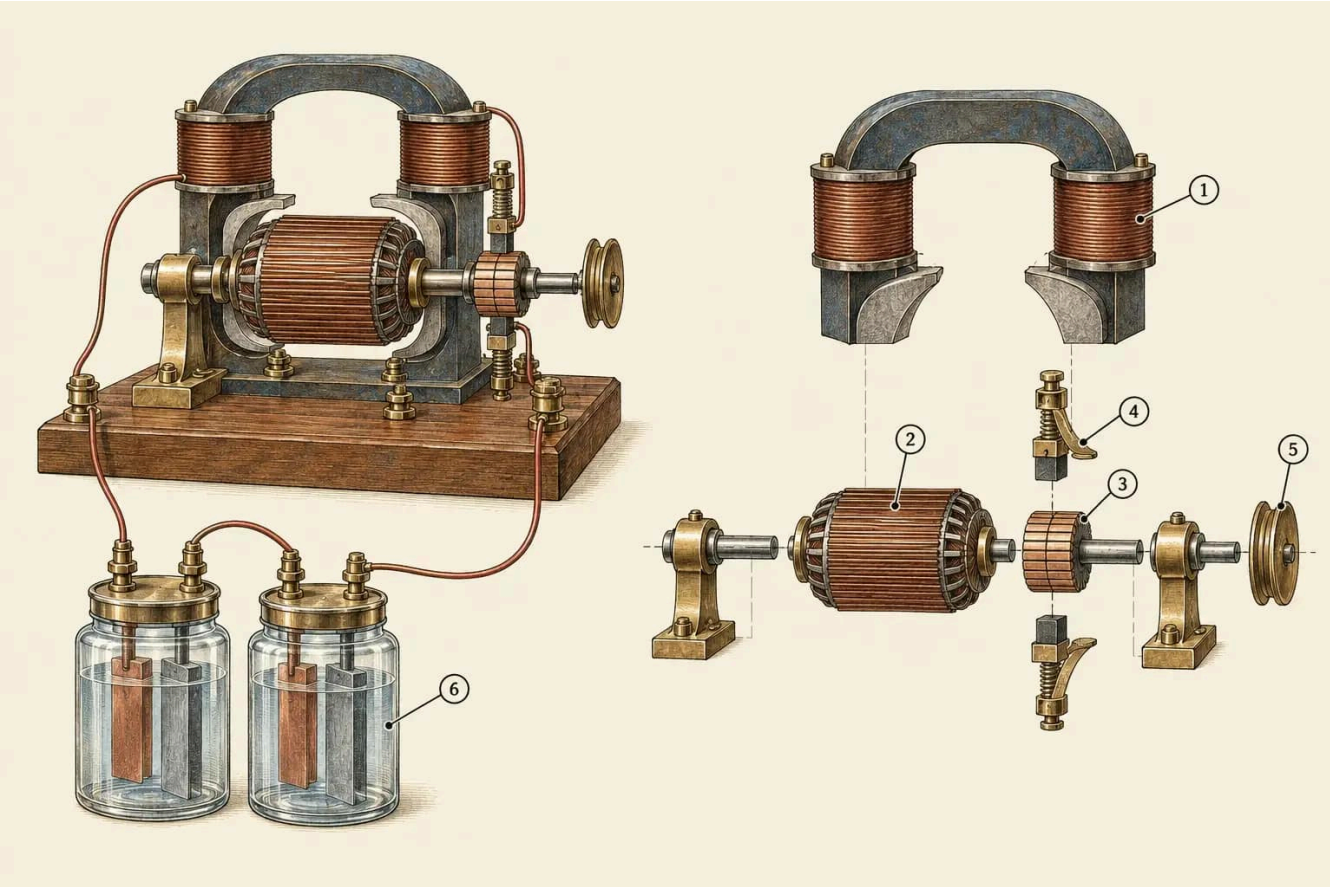
Faits vérifiés le 2026-10-11

Moteur électrique

Le courant changé en rotation

1834 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Pile électrique (p. 242), Métallurgie du fer (p. 138)



1 Inducteur (aimant de champ) 2 Bobinage de l'induit 3 Commutateur 4 Balai 5 Arbre et poulie 6 Pile

Un moteur électrique change le courant en rotation : une bobine parcourue par un courant entre les pôles d'un aimant est poussée de côté, et un commutateur ou un champ tournant garde cette poussée dans le même sens. Le moteur de Moritz Jacobi, en 1834, fournissait bien plus de puissance que tous ses prédécesseurs ; les systèmes entraînés par moteur consomment aujourd'hui environ la moitié de l'électricité mondiale.

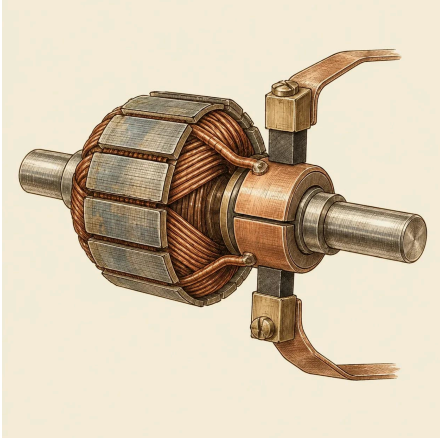
Ce que c'est

Un moteur électrique transforme un courant électrique en rotation. Il entraîne ventilateurs, pompes, ascenseurs, tramways et machines-outils. Selon la plateforme Electric Motor Systems du programme 4E de l'Agence internationale de l'énergie, les systèmes entraînés par moteur ont consommé environ 53 % de l'électricité mondiale en 2023.

La planche montre un moteur à courant continu de la fin du XIXe siècle, alimenté par une pile.

Comment ça marche

Un fil parcouru par un courant, placé dans un champ magnétique, subit une poussée latérale, perpendiculaire à la fois au courant et au champ. Dans une bobine placée entre deux pôles, les deux grands côtés sont parcourus en sens inverse : l'un est poussé vers le haut, l'autre vers le bas, et la bobine tourne.



Commutateur à deux segments : les balais changent de moitié à chaque demi-tour.

Seule, la bobine pivoterait jusqu'à ce que son plan soit perpendiculaire au champ, oscillerait un peu et s'arrêterait là. Le commutateur (on dit aussi collecteur) l'en empêche. C'est une bague montée sur l'arbre et découpée en segments isolés, chacun relié à la bobine ; deux balais fixes frottent dessus et amènent le courant. Dans sa forme la plus simple, à deux segments, les balais passent à l'autre segment à chaque demi-tour, le courant s'inverse dans la bobine et le couple garde le même sens.

Un induit de machine porte de nombreuses bobines réparties autour d'un tambour de fer, chacune reliée à ses propres segments, ce qui rend le couple régulier. Ce fer est fait de tôles minces isolées : un noyau massif serait parcouru de courants de Foucault qui gaspillent l'énergie en chaleur. Le champ vient d'aimants permanents dans beaucoup de petits moteurs, et d'électroaimants dans la plupart des machines du XIXe siècle, comme celle de la planche.

Un induit qui tourne fonctionne aussi en générateur. Ses bobines produisent une tension opposée à l'alimentation, la force contre-électromotrice, qui croît avec la vitesse. Au démarrage, elle est nulle, et le courant peut atteindre plusieurs fois sa valeur de marche. À mesure que le moteur accélère, elle augmente et le courant baisse, jusqu'à ce que le couple équilibre la charge. Entraînée à la main, avec son champ établi et une charge branchée, la même machine débite du courant : moteur et générateur sont un seul appareil utilisé dans les deux sens.

Les moteurs asynchrones, alimentés en courant alternatif, n'ont pas de commutateur. Des enroulements fixes parcourus par des courants décalés dans le temps créent un champ magnétique tournant. Il induit des courants dans les barres de cuivre ou d'aluminium du rotor, qui tourne un peu moins vite que le champ.

Comment le fabriquer

Le moteur des salles de classe demande une pile de 1,5 V (format D ou AA), environ un mètre de fil de cuivre émaillé de 0,5 à 0,8 mm, deux grands trombones, un aimant en disque (ferrite ou néodyme), un élastique solide et du papier de verre fin.

Bobiner. Enrouler le fil 10 à 20 fois autour d'un feutre, en laissant 4 à 5 cm droits à chaque bout. Passer chaque extrémité deux fois autour du faisceau pour le tenir. Les deux bouts doivent sortir de part et d'autre de la bobine, alignés sur son centre : ils forment l'axe.

Faire le commutateur. Sur un bout, poncer tout l'émail. Sur l'autre, tenir la bobine debout comme elle sera montée et n'ôter l'émail que sur la moitié supérieure du fil. Ce bout conduit pendant un demi-tour et isole pendant l'autre, si bien que la bobine n'est jamais repoussée en arrière ; elle franchit le demi-tour mort sur son élan.

Monter les supports. Plier chaque trombone en montant, avec un pied plat en bas et une petite boucle en haut. Tendre l'élastique dans la longueur de la pile, par-dessus les deux pieds, pour qu'il plaque chaque trombone contre une borne. Poser l'aimant sur le flanc de la pile, sous les boucles : il tient sur l'enveloppe d'acier. Placer la bobine dans les boucles, à quelques millimètres au-dessus de l'aimant.

Le commutateur du moteur à trombones : cuivre nu dessus, émail laissé dessous ; le courant ne passe que pendant le demi-tour où le côté nu repose sur le trombone.

Lancer. Donner une légère pichenette à la bobine. Si elle ne fait qu'osciller, la retourner bout pour bout ou reponcer le côté dénudé.

Passer à plus grand. Un aimant plus fort donne plus de couple ; davantage de spires aussi, tant que le fil plus long ne réduit pas trop le courant. Un moteur d'atelier réunit plusieurs bobines sur un noyau de fer feuilleté, avec un commutateur à nombreux segments et des balais à ressort, comme sur la planche.

> **Sécurité.** N'utiliser qu'une ou deux piles ordinaires de 1,5 V : jamais le secteur, une batterie de voiture ou une batterie lithium-ion. La bobine est presque un court-circuit, et ces sources peuvent débiter assez de courant pour brûler la peau, faire fondre le fil ou mettre le feu. Même une petite pile chauffe, que le moteur tourne ou non : faire des essais courts et surveillés, et débrancher la pile dès qu'elle ou le fil tiédit, avant tout réglage ou ponçage, et après usage. Les aimants au néodyme se collent assez fort pour pincer la peau et peuvent éclater. Les tenir loin des stimulateurs cardiaques et autres implants médicaux, et hors de portée des jeunes enfants : deux aimants avalés peuvent s'attirer à travers la paroi de l'intestin.

Histoire et évolution

En 1820, Hans Christian Ørsted voit l'aiguille d'une boussole dévier près d'un fil parcouru par un courant. Le 3 septembre 1821, Michael Faraday fait tourner autour d'un aimant un fil qui plonge dans du mercure, et en 1822 Peter Barlow fait tourner une roue en étoile entre les pôles d'un aimant. Ce sont des démonstrations presque sans puissance. Les champs puissants arrivent avec l'électroaimant, que William Sturgeon réalise au milieu des années 1820, et vers 1832 William Ritchie et Sturgeon construisent des machines tournantes munies d'un commutateur.

La rotation de Faraday (1821) : le bout libre du fil tourne autour de l'aimant.

En mai 1834, à Königsberg, Moritz Hermann Jacobi achève un moteur à huit électroaimants en fer à cheval qui développe environ 15 watts. Cette planche retient 1834 : Faraday a montré le principe et le petit moteur de Sturgeon faisait déjà tourner une broche à rôtir, mais la machine de Jacobi est bien plus puissante, et aucun autre constructeur ne l'égale avant 1839 environ. Le brevet américain de Thomas Davenport date de 1837.

Les piles rendent ces moteurs coûteux jusqu'à ce que le générateur apporte un courant bon marché. En 1873, on constate qu'une dynamo de Zénobe Gramme tourne en moteur quand une autre l'alimente. Galileo Ferraris, à Turin, étudie le champ tournant à partir de 1885 et publie en mars 1888 ; Nikola Tesla, qui travaille de son côté à New York, obtient son brevet de moteur à induction le 1er mai 1888. Aujourd'hui, des moteurs à aimants pilotés par l'électronique équipent drones et voitures électriques.

Chiffres clés

Moteur de Jacobi, mai 1834

Environ 15 W à 60–130 tr/min, alimenté par des piles zinc-cuivre

Premier brevet américain de moteur

Thomas Davenport, brevet n° 132, février 1837

Champ magnétique tournant

Galileo Ferraris, publié en mars 1888 ; brevet de Nikola Tesla, 1er mai 1888

Part de l'électricité mondiale

Environ 53 % consommés par les systèmes à moteur en 2023

Sources

1. The invention of the electric motor 1800–1854 · Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology https://www.eti.kit.edu/english/1376.php
2. Jacobi's Motor · Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology https://www.eti.kit.edu/english/1382.php
3. 200 Years Ago, Faraday Invented the Electric Motor · IEEE Spectrum https://spectrum.ieee.org/200-years-ago-faraday-invented-the-electric-motor
4. Barlow's Wheel – 1822 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/barlow-s-wheel-1822/
5. Replica of William Sturgeon's rotary electromagnetic engine · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co36713/replica-of-william-sturgeons-rotary-electromagnetic-engine
6. Zenobe Gramme · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Zenobe_Gramme
7. Milestones: Rotating Fields and Early Induction Motors, 1885–1888 · IEEE, Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Rotating_Fields_and_Early_Induction_Motors,_1885-1888
8. Tesla's Electro-magnetic motor · Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Tesla's_Electro-magnetic_motor
9. AC Motors · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/magnetic/motorac.html
10. Simple DC Motor (demonstration 5K40.18) · Oberlin College Physics Department https://www2.oberlin.edu/physics/catalog/demonstrations/em/simpledcmotor.html
11. Policy Brief: Electric Motor Systems, why are they important? · IEA 4E Electric Motor Systems Platform (EMSA) https://www.iea-4e.org/emsa/publications/policy-brief-electric-motor-systems-why-are-they-important/
12. College Physics 2e, 22.8 Torque on a Current Loop: Motors and Meters · OpenStax, via LibreTexts https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_(OpenStax)/22%3A_Magnetism/22.08%3A_Torque_on_a_Current_Loop_-_Motors_and_Meters
13. College Physics 2e, 23.6 Back Emf · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/23-6-back-emf
14. RE-280RA/SA metal-brush motor datasheet · Mabuchi Motor Co. (copy hosted by the University of North Carolina at Charlotte) https://webpages.charlotte.edu/~jmconrad/ECGR4161-2009-01/labs/re_280rasa.pdf

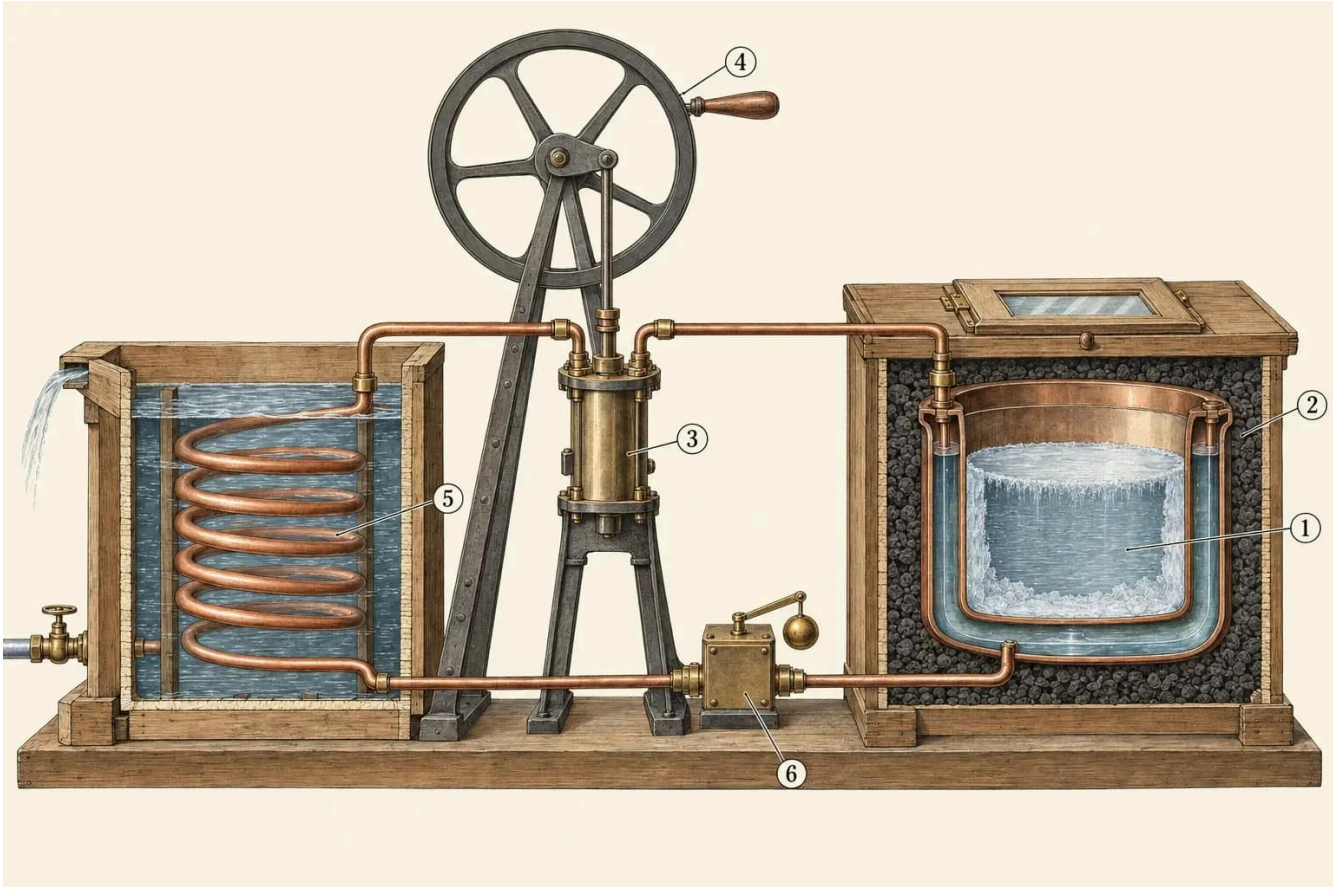
Faits vérifiés le 2026-10-14

Réfrigération

Pomper la chaleur hors d'une boîte

1834 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Machine à vapeur (p. 229), Pompe à piston (p. 163), Thermomètre et baromètre (p. 224), Distillation (p. 176)



1 Bassine à double paroi contenant l'eau à congeler 2 Caisse garnie de charbon de bois 3 Pompe 4 Volant et poignée 5 Serpentin dans sa cuve d'eau de refroidissement 6 Boîte à soupape lestée

La réfrigération maintient un espace plus froid que son environnement en y faisant bouillir un liquide, qui absorbe la chaleur, puis en emportant la vapeur au-dehors pour la comprimer et la ramener à l'état liquide. Jacob Perkins fit breveter à Londres en 1834 la première machine à compression de vapeur en circuit fermé; les machines à ammoniac équipaient brasseries et navires dans les années 1870, et le réfrigérateur électrique domestique se répandit à partir de la fin des années 1920.

Ce que c'est

Un réfrigérateur extrait la chaleur d'un espace clos et la rejette au-dehors, du froid vers le chaud, à l'inverse du sens où la chaleur circule d'elle-même. Les aliments se conservent mieux parce que les bactéries et les moisissures qui les gâtent se développent lentement au froid. Les mêmes machines fabriquent la glace, refroidissent la bière pendant le brassage, transportent la viande congelée d'un continent à l'autre et climatisent les bâtiments.

Presque toutes fonctionnent selon le cycle à compression de vapeur. La planche en montre la première forme opérationnelle: une machine à éther construite à Londres par l'ingénieur John Hague d'après le brevet de Jacob

Perkins de 1834. Sa pompe se manœuvrait à la main.

Comment ça marche

Un liquide qui s'évapore prend de la chaleur à tout ce qu'il touche ; la sueur rafraîchit la peau de la même façon. Plus la pression est basse, plus la température d'ébullition baisse : l'éther bout vers 35 °C à l'air libre, mais dans un récipient où une pompe maintient une faible pression, il bout bien au-dessous du point de congélation de l'eau.

La double jarre d'argile repose sur le même effet : l'eau qui s'évapore du sable humide prend la chaleur du pot intérieur.

Sur la machine de Hague, la bassine de cuivre à double paroi contient l'eau à congeler dans sa cuvette intérieure, et l'éther occupe l'espace entre les deux parois. La pompe aspire la vapeur d'éther en haut de cette enveloppe : l'éther liquide continue donc de bouillir et retire de la chaleur à l'eau jusqu'à ce qu'elle gèle. Du charbon de bois en poudre tassé autour de la bassine freine la chaleur qui vient de la pièce.

La même pompe refoule ensuite la vapeur dans un tuyau de cuivre enroulé, le serpentin, plongé dans une cuve d'eau courante. Une soupape chargée à environ 15 livres par pouce carré, un peu plus d'un bar, retient la vapeur sous pression dans le serpentin. Comprimée et refroidie par l'eau, la vapeur redevient liquide et cède la chaleur prise à la bassine, augmentée du travail fourni à la pompe. Le liquide franchit la soupape, sa pression tombe, et il retourne dans l'enveloppe pour bouillir de nouveau. La même charge d'éther tourne ainsi en boucle sans s'user.

Un réfrigérateur moderne fait la même chose avec un compresseur électrique, une grille de tubes à l'arrière qui chauffe la cuisine, un tube fin ou un détendeur où la pression chute, et un évaporateur dans l'appareil. Les réfrigérateurs à absorption remplacent la pompe par un liquide qui absorbe la vapeur du fluide frigorigène et par un brûleur ou une résistance qui l'en chasse à nouveau.

Comment le fabriquer

Un vrai circuit frigorifique contient un fluide volatil sous pression. L'éther est très inflammable et sa vapeur peut exploser ; l'ammoniac est toxique ; les fluides actuels sont stockés liquides sous plusieurs bars et certains sont inflammables. Les machines sont construites et chargées en usine ; laissez toute ouverture, tout remplissage ou toute vidange d'un circuit à des frigoristes qualifiés, selon les règles locales. Ne fabriquez ni compresseur ni récipient sous pression, et ne coupez ni ne percez jamais les tuyaux d'un vieux réfrigérateur.

L'effet sur lequel il repose se montre sans danger avec un rafraîchisseur à double jarre.

Choisir les pots. Prenez deux pots de terre cuite non vernissée, neufs et propres, l'un plus large que l'autre d'environ 5 cm tout autour ; celui de l'intérieur, en contact avec les aliments, doit être vendu pour un usage alimentaire, jamais un vieux pot de jardin. Bouchez les trous d'écoulement avec de l'argile ou un bouchon.

Remplir l'intervalle. Versez une couche de sable au fond du grand pot, posez le petit dessus et remplissez de sable l'espace entre les deux jusqu'au bord.

Mouiller. Versez de l'eau propre dans le sable jusqu'à ce qu'il soit imbibé sans être noyé. Couvrez le pot intérieur d'un linge de coton humide.

Placer. Mettez le rafraîchisseur à l'ombre, là où l'air sec circule autour. L'eau qui suinte à travers la paroi extérieure s'évapore et prend de la chaleur au sable et au pot intérieur. Par temps chaud et sec, l'intérieur peut rester

plusieurs degrés au-dessous de la température ambiante ; par temps humide, l'effet est faible. Rajoutez de l'eau une ou deux fois par jour.

> **Sécurité.** Un rafraîchisseur à évaporation ralentit seulement l'altération : il n'atteint pas les 5 °C ou moins nécessaires pour la viande, le poisson ou les produits laitiers ; réservez-le aux fruits et légumes entiers, non coupés, qui se gardent à température ambiante, jamais aux fruits coupés, aux salades ni aux plats cuisinés, et vérifiez sa température avec un thermomètre. Gardez le sable et le linge propres et faites sécher les pots régulièrement pour éviter les moisissures. N'ouvrez, ne percez et ne chauffez jamais le circuit d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur.

Histoire et évolution

Avant l'arrivée des machines dans la cuisine, une glacière doublée de zinc était refroidie par un bloc de glace.

Bien avant toute machine, on conservait la glace de l'hiver dans des fosses et des glacières, et l'on rafraîchissait l'eau dans des jarres poreuses. En Écosse, William Cullen montra qu'un liquide qui s'évapore vite sous pression réduite, de l'éther dans sa démonstration la plus connue, refroidit l'eau qui l'entoure jusqu'à la geler ; les récits datent ces travaux entre 1748 et 1756. L'expérience resta une démonstration de laboratoire. En 1805, l'Américain Oliver Evans décrivit un cycle fermé à compression de vapeur, sans jamais le construire.

Jacob Perkins, inventeur américain installé à Londres, fit breveter une machine en circuit fermé le 14 août 1834. Hague la construisit ; elle produisit un peu de glace mais ne trouva pas d'acheteur. L'idée devint une industrie dans les années 1850, quand James Harrison en Australie et Alexander Twining aux États-Unis construisirent les premières machines à glace vendues commercialement. En 1859, le Français Ferdinand Carré fit breveter une machine à absorption à l'ammoniac dissous dans l'eau. Dans les années 1870, Carl von Linde conçut à Munich des machines à compression d'ammoniac ; l'une des premières, vendue en 1876, partit pour une brasserie de Trieste. La même année, le navire français Frigorifique, équipé par Charles Tellier, transporta pour la première fois par mer une cargaison de viande réfrigérée entre Rouen et Buenos Aires.

Les petits moteurs électriques rendirent possible le réfrigérateur domestique. Le Monitor Top de General Electric, en 1927, avec son compresseur logé dans un tambour posé sur l'appareil, coûtait environ 525 dollars à sa sortie et descendit vers 200 dollars en quelques années. Les chlorofluorocarbures comme le Fréon, mis au point en 1928 et produits commercialement à partir du début des années 1930, remplacèrent ensuite les fluides toxiques ou inflammables des premiers appareils ménagers, comme le dioxyde de soufre, le chlorure de méthyle et l'ammoniac. On découvrit plus tard qu'ils détruisaient la couche d'ozone, et le protocole de Montréal de 1987 organisa leur abandon ; en 2016, l'amendement de Kigali y ajouta leurs remplaçants, les HFC, de puissants gaz à effet de serre. En 2024, l'Institut international du froid estimait que le froid et la climatisation consomment environ un cinquième de l'électricité mondiale.

Le Monitor Top de 1927 : le compresseur est logé dans le tambour, et le serpentin de cuivre qui l'entoure rejette la chaleur retirée de l'armoire.

Chiffres clés

Brevet de Perkins

Brevet britannique n° 6662, 14 août 1834, éther comme fluide de travail

Machine à absorption à l'ammoniac de Carré

1859, France

Part de l'électricité mondiale consacrée au froid

Environ 20 % (Institut international du froid)

Soupape lestée de la machine de Hague

Chargée à environ 15 livres par pouce carré (environ 1 bar)

Protocole de Montréal sur les gaz qui détruisent l'ozone

Signé en 1987, en vigueur en 1989 ; HFC ajoutés à Kigali en 2016

Sources

1. #274 Perkins Vapor-Compression Cycle for Refrigeration (landmark brochure) · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/getmedia/cb9bea09-6d23-425e-bfe5-5f6d786919fb/274-Perkins-Vapor-Comp-Refrig.pdf
2. Froid · Encyclopédie Larousse https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/froid/53766
3. Historical beginnings: using natural refrigeration · Chillventa / NürnbergMesse https://www.chillventa.de/en/expert-insights/refrigeration/beginnings-of-refrigeration
4. Cornerstones of compression: making cold · COMPRESSORtech2 https://www.compressortech2.com/news/cornerstones-of-compression-making-cold/8054876.article
5. GE Monitor-Top Refrigerator · Albany Institute of History & Art https://albanyinstitute.org/online-exhibition/50-objects/section/ge-monitor-top-refrigerator
6. The Montreal Protocol · UNEP Ozone Secretariat https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol
7. New IIR figures highlight the role of the refrigeration sector · International Institute of Refrigeration https://iifiir.org/en/news/de-nouveaux-chiffres-de-l-iif-mettent-en-lumiere-la-place-du-secteur-du-froid
8. Got a question about Monitor Top refrigerators? (model history) · cool386.com https://www.cool386.com/ge/ge1.html
9. Diethyl ether: phase change data (vapour pressure, enthalpy of vaporization) · NIST Chemistry WebBook https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C60297&Mask=4
10. Diethyl ether (compound summary, vapor pressure) · PubChem, National Library of Medicine https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3283

Faits vérifiés le 2026-10-12

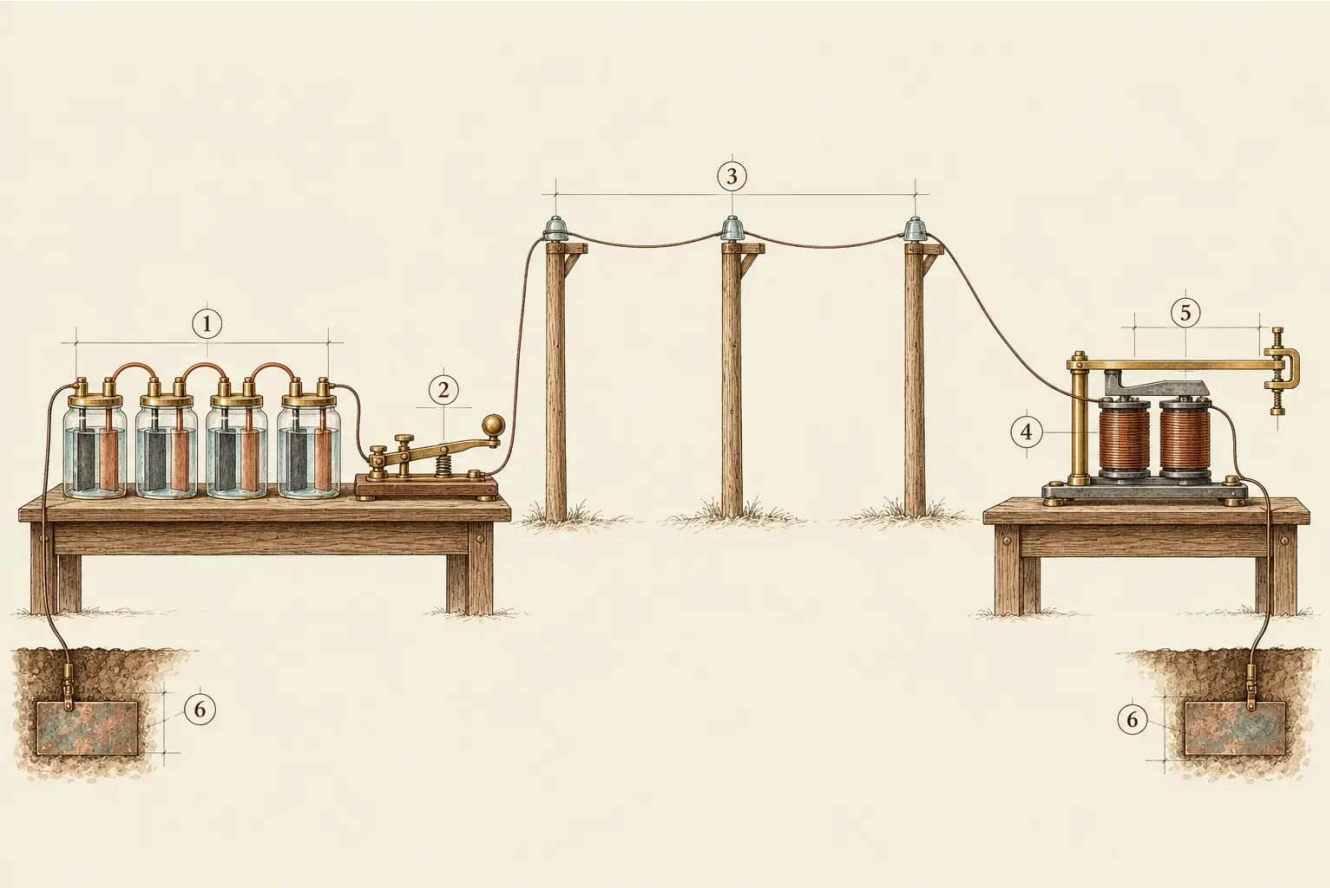
Télégraphe électrique

Des messages écrits envoyés par un fil

1837 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Pile électrique (p. 242), Écriture (p. 87)

Mène à : Radio (p. 347), Téléphone (p. 320)



1 Pile 2 Manipulateur 3 Fil de ligne sur ses isolateurs 4 Électroaimant du parleur 5 Levier de l'armature 6 Plaque de terre

Le télégraphe électrique transmet des messages le long d'un fil sous forme d'impulsions de courant fournies par une pile, établies et coupées avec un manipulateur et lues à l'arrivée par un électroaimant. William Cooke et Charles Wheatstone firent breveter un télégraphe à aiguilles en Grande-Bretagne en 1837, Samuel Morse et Alfred Vail présentèrent leur télégraphe enregistreur en 1838, et trente ans plus tard des câbles reliaient les continents.

Ce que c'est

Le télégraphe électrique envoie des messages écrits sous forme de signaux électriques le long d'un fil. À un bout, un opérateur ouvre et ferme un circuit ; à l'autre bout, un appareil bouge chaque fois que le courant passe. Les lettres sont épelées au moyen d'un code. Dans les premiers appareils à cinq aiguilles de Cooke et Wheatstone, les aiguilles désignaient des lettres sur un cadran ; les appareils à aiguilles suivants utilisaient un code de déviations à gauche et à droite.

La planche montre la forme la plus simple, la ligne à un seul fil utilisée avec le code Morse : une pile, un manipulateur, une file de poteaux et, au poste d'arrivée, un parleur. Le sol lui-même ramène le courant.

Comment ça marche

La pile est une rangée d'éléments, chacun formé d'une plaque de zinc et d'une plaque de cuivre plongées dans un liquide, montés en série pour que leurs tensions s'additionnent. Un pôle de la pile va à la terre par une plaque métallique enterrée, l'autre au manipulateur. Celui-ci est un levier de laiton à ressort : quand on l'abaisse, il ferme un contact et relie la pile à la ligne.

Le courant parcourt le fil de ligne, porté par des isolateurs de verre pour qu'il ne se perde pas dans le bois humide des poteaux, puis traverse les bobines d'un électroaimant au poste d'arrivée. De là, il descend dans le sol par une seconde plaque de terre et revient à la pile à travers la terre. Utiliser le sol comme conducteur de retour économise la moitié du fil.

Tant que le courant passe, les bobines deviennent un aimant et attirent une armature de fer fixée à un levier pivotant, qui heurte une butée avec un déclic. Quand on relâche le manipulateur, un ressort relève le levier contre une seconde butée, avec un autre bruit. Un appui bref donne un point, un appui plus long un trait, et leurs combinaisons représentent lettres et chiffres. Les premiers appareils de Morse gaufraient ou traçaient à l'encre points et traits sur une bande de papier en mouvement, mais les opérateurs comprirent vite qu'ils pouvaient lire les déclics à l'oreille.

Un manipulateur Morse : appuyer sur le bouton ferme le contact situé sous le levier.

Comment le construire

Un manipulateur et un parleur se construisent sur une table et fonctionnent avec une petite pile, ce qui rend le principe facile à voir.

Bobiner l'électroaimant. Enroulez environ 30 mètres de fil de cuivre émaillé de 0,2 mm de diamètre en couches régulières autour d'un gros clou ou d'un boulon en fer d'une dizaine de centimètres, en laissant les deux bouts libres. Grattez l'émail sur le dernier centimètre de chaque bout. Cette bobine a une résistance d'environ 16 ohms : une pile de 4,5 volts formée de trois piles AA y fait passer moins de 0,3 ampère.

Faire le parleur. Percez un trou dans une planchette et collez-y le clou debout, tête en haut, sans écraser l'enroulement. Découpez dans une boîte de conserve une bande de fer-blanc d'environ 1 cm sur 8 cm, limez-en les bords et vissez une extrémité sur une cale de bois de façon que l'autre bout se trouve à quelques millimètres au-dessus de la tête du clou. Cintrez-la pour qu'elle revienne quand on la pousse, et fixez une vis dans une petite potence de bois juste au-dessus du bout libre : la bande claque sur le clou quand elle est attirée et contre la vis quand elle remonte. Réglez l'écart à 2 ou 3 mm, en cintrant la bande jusqu'à ce qu'elle soit attirée franchement et revienne bien.

Faire le manipulateur. Vissez sur une autre planchette une lame de laiton souple ou une bande de fer-blanc pliée, de façon qu'un bout se soulève un peu. Placez sous le bout libre une punaise ou une vis qui servira de contact.

Câbler. Reliez un bout de la bobine à une borne d'un boîtier de trois piles AA. Reliez l'autre borne au contact fixe du manipulateur, et la lame du manipulateur à l'autre bout de la bobine. Entre les deux planchettes, utilisez du fil de sonnette ordinaire, sur une dizaine de mètres au plus : un fil plus long ou plus fin ajoute de la résistance, et la bande risque de ne plus être attirée.

Émettre. Appuyez sur le manipulateur : la lame claque sur le clou et remonte quand vous relâchez. Convenez d'un code avec un partenaire et envoyez des mots courts.

> **Sécurité.** N'utilisez qu'une petite pile de quelques volts et ne branchez jamais rien sur le secteur. Ne laissez pas le manipulateur enfoncé longtemps, car la bobine et les piles chauffent, et débranchez la pile quand vous arrêtez. Ne reliez jamais directement les deux bornes de la pile. Les bords de fer-blanc coupent : limez-les et portez des gants.

Histoire et évolution

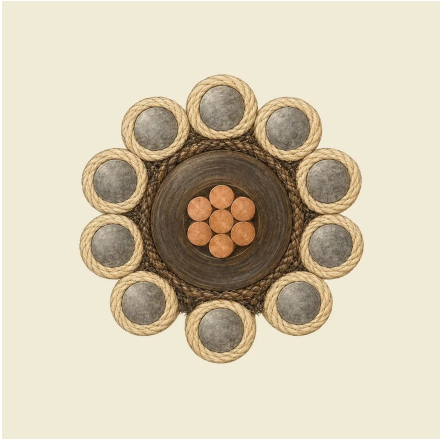
Avant l'électricité, le télégraphe optique de Chappe transmettait les signaux de tour en tour ; un message pouvait aller de Paris à Lille en une demi-heure environ.

Le mot télégraphe désigna d'abord le système optique de Claude Chappe et de ses frères, présenté en 1791. Sa première ligne, de Paris à Lille, ouvrit en 1794 et couvrait environ 230 km. Dans chaque tour, des opérateurs plaçaient des bras de bois dans des positions convenues et lisaient la tour suivante à la lunette. À son apogée, le réseau français s'étendait sur près de 5 000 km.

Le télégraphe électrique devint possible quand les piles purent fournir un courant régulier et les électroaimants le détecter. En Grande-Bretagne, William Fothergill Cooke et Charles Wheatstone firent breveter en juin 1837 un télégraphe à aiguilles, décrit avec cinq aiguilles, et essayèrent la même année un appareil à aiguilles entre les gares londoniennes d'Euston et de Camden Town. En 1839, le Great Western Railway installa l'un de leurs télégraphes sur environ 21 km de ligne au départ de Paddington. Les appareils britanniques suivants n'eurent plus besoin que d'une ou deux aiguilles.

Aux États-Unis, Samuel Morse, peintre et professeur à New York, travailla avec Alfred Vail, qui construisait les instruments. Ils présentèrent leur télégraphe le 6 janvier 1838 aux forges de la famille Vail, près de Morristown, sur environ trois kilomètres de fil. En 1843, le Congrès vota 30 000 dollars pour une ligne de Washington à Baltimore, et le 24 mai 1844 Morse y transmit la phrase « What hath God wrought » (« Qu'a fait Dieu ? »). En 1850, les lignes atteignaient toutes les villes importantes à l'est du Mississippi, et l'une d'elles rejoignit la Californie en 1861.

Un câble sous-marin relia Douvres et Calais en 1851. Le premier câble transatlantique, posé en août 1858, cessa de fonctionner au bout de quelques semaines ; un câble durable fut atterri en juillet 1866. Les ingénieurs apprirent à faire passer plusieurs messages sur un même fil, d'abord un dans chaque sens en même temps avec le duplex mis au point par Joseph Stearns en 1868, puis deux dans chaque sens avec le quadruplex de Thomas Edison. Le trafic télégraphique britannique culmina vers 1900, à environ 90 millions de messages par an. Le téléphone prit ensuite l'essentiel du travail, et vers 1980 les satellites et les nouveaux câbles avaient rendu la télégraphie sous-marine obsolète.



Coupe du câble transatlantique de grand fond de 1865-1866 : sept fils de cuivre dans la gutta-percha, une couche de jute goudronné et dix fils de fer gainés de chanvre.

Chiffres clés

Brevet de Cooke et Wheatstone
Juin 1837, cinq aiguilles et six fils

Ligne Washington-Baltimore
30 000 dollars votés par le Congrès en 1843 ; premier message le 24 mai 1844

Réseau optique Chappe à son apogée
Près de 5 000 km de tours à signaux, remplacées par des lignes électriques dans les années 1850

Première démonstration de Morse et Vail
6 janvier 1838, forges de Speedwell (New Jersey), sur environ 3 km de fil

Câble transatlantique durable
Juillet 1866, après un câble de 1858 tombé en panne en quelques semaines

Sources

1. Telegraph · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Telegraph
2. Milestones: Demonstration of Practical Telegraphy, 1838 · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Milestones:Demonstration_of_Practical_Telegraphy,_1838
3. Cooke and Wheatstone · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Cooke_and_Wheatstone
4. Submarine cable section (Atlantic cable, 1865) · Royal Museums Greenwich https://rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-6204
5. Sample of the 1865/66 Transatlantic Telegraph Cable · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co34219/sample-of-the-1865-66-transatlantic-telegraph-cab-cable
6. Modern Practice of the Electric Telegraph (appendix and notes) · Frank L. Pope, 1869 (insulators.info) https://www.insulators.info/books/mpet/chap10.htm
7. Insulator Tests, The Journal of the Telegraph, 16 December 1872 · Western Union (insulators.info) https://reference.insulators.info/publications/view/?id=11419
8. Resistivity and temperature coefficient at 20 C · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html
9. Copper Wire Tables (Handbook 100) · National Bureau of Standards https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/hb/nbshandbook100.pdf
10. Electromagnet · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnet

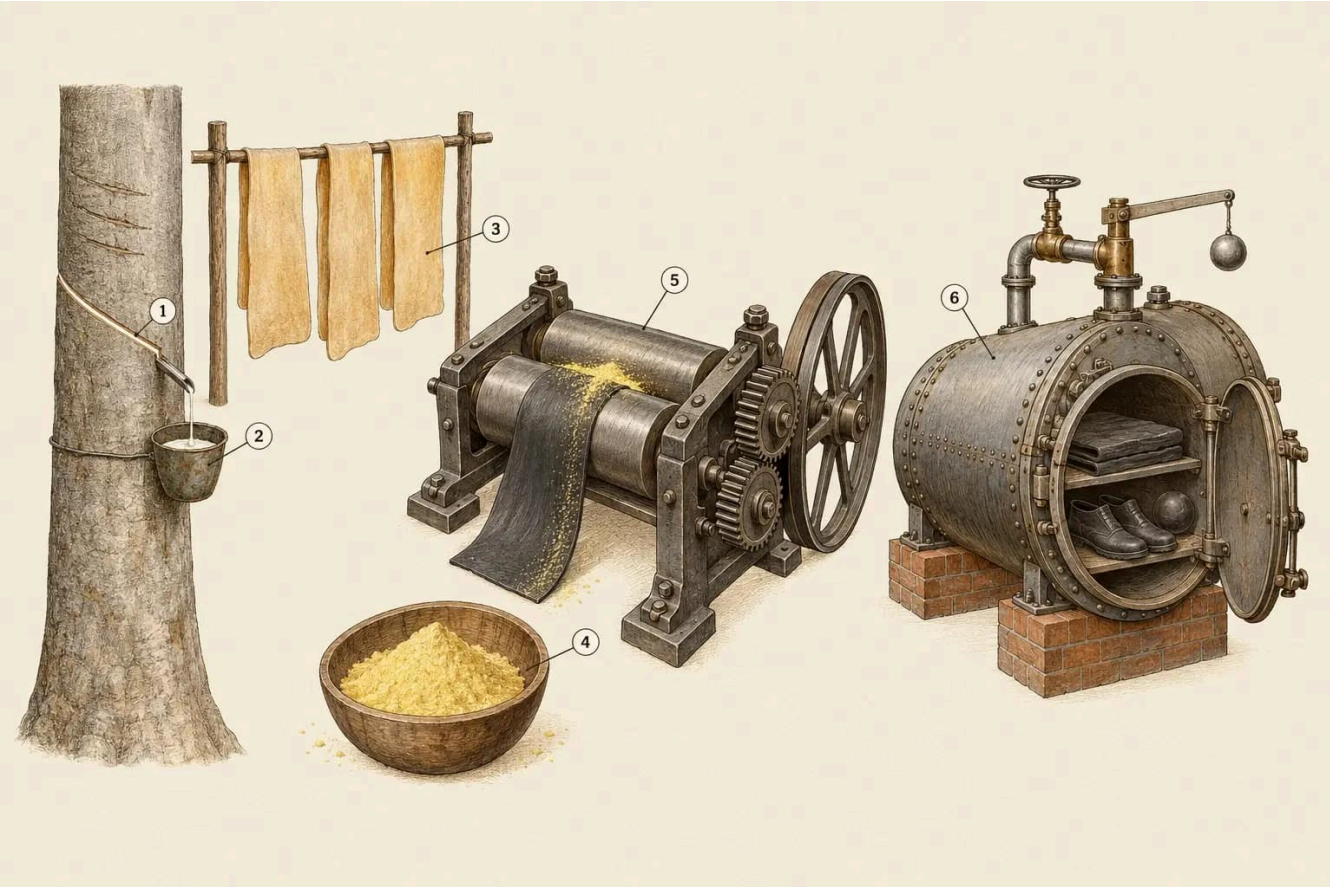
Faits vérifiés le 2026-10-12

Caoutchouc vulcanisé

Une sève rendue robuste par le soufre

1839 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite : Maîtrise du feu (p. 9)



1 Saignée 2 Godet à latex 3 Feuilles de caoutchouc brut 4 Soufre 5 Mélangeur à deux cylindres 6 Autoclave de vulcanisation

Le caoutchouc vulcanisé est un caoutchouc dont les longues molécules ont été reliées entre elles, d'abord en chauffant du caoutchouc naturel avec du soufre : il reste élastique à la chaleur comme au froid au lieu de devenir collant ou cassant. Charles Goodyear aux États-Unis et Thomas Hancock en Grande-Bretagne mirent au point le procédé au début des années 1840, ce qui rendit le caoutchouc utilisable pour les pneus, les tuyaux, les joints et les chaussures.

Ce que c’est

Le caoutchouc naturel provient du latex, un liquide laiteux qui s’écoule des entailles faites dans l’écorce de certains arbres tropicaux, aujourd’hui surtout l’hévéa, Hevea brasiliensis. Séché et pressé, il est imperméable et extensible, mais le caoutchouc brut devient mou et poisseux par temps chaud, raide et craquelé par le gel, et il se déforme peu à peu sous une charge.

La vulcanisation corrige ces défauts. On mélange le caoutchouc à un peu de soufre et on le chauffe. On obtient le matériau des pneus, des tuyaux, des bandes transporteuses, des joints, des bottes et des élastiques, qui reprend sa forme sur une large plage de températures.

Comment ça marche

Le caoutchouc est fait de molécules en chaîne très longues, chacune formée de milliers de petits motifs. Dans le caoutchouc brut, ces chaînes sont emmêlées comme des spaghettis cuits. Quand on tire, elles se déplient ; quand on lâche, elles se recroquevillent, d'où l'élasticité. Mais rien ne les lie entre elles : sous une traction prolongée ou à la chaleur, elles glissent les unes sur les autres, et la matière flue et colle.

En Mésoamérique, on faisait le caoutchouc en mêlant le latex de Castilla elastica au jus d'une liane de la famille des liserons.

À la température de vulcanisation, des atomes de soufre se fixent en certains points des chaînes et forment des ponts entre chaînes voisines, d'un ou de plusieurs atomes de soufre chacun. Quelques ponts par chaîne suffisent à transformer l'enchevêtrement en un seul réseau lâche. Il peut encore s'étirer beaucoup, car les segments de chaîne entre deux ponts peuvent se déplier, mais il ne flue plus et reprend sa forme quand on le relâche.

Le nombre de ponts règle la dureté. Un caoutchouc souple ne demande qu'une faible proportion de soufre. Avec beaucoup plus, le réseau devient si serré que le produit, l'ébonite ou caoutchouc durci, est rigide et cassant. Chauffé avec le seul soufre, le caoutchouc vulcanise lentement ; depuis le début du XXe siècle, des accélérateurs, activés par l'oxyde de zinc et l'acide stéarique, rendent la réaction plus rapide et plus régulière.

Comment on le fabrique

Goodyear raconta avoir découvert l'effet quand un mélange de caoutchouc et de soufre toucha un poêle chaud et charbonna sans fondre.

Les objets en caoutchouc se fabriquent en usine, avec des presses chauffantes, des salles de mélange ventilées et des captages de fumées. Le soufre chaud s'enflamme facilement et brûle en dégageant du dioxyde de soufre, toxique, les mélanges en cuisson émettent des fumées irritantes et les accélérateurs modernes irritent la peau et les poumons : la vulcanisation n'est pas une opération domestique. Les étapes habituelles sont les suivantes.

Saigner. Tous les deux jours environ, on enlève une fine lamelle d'écorce le long d'une entaille en pente, assez profonde pour ouvrir les vaisseaux à latex sans atteindre le cambium, la fine couche de croissance située sous l'écorce. Le latex suit l'entaille et coule dans un godet.

Coaguler. On dilue le latex et on le fait prendre avec un acide faible, acide formique ou acétique ; le caoutchouc se sépare en un caillé mou. On le presse en feuilles et on le sèche, souvent à la fumée, qui protège aussi des moisissures.

Mélanger. On travaille le caoutchouc brut entre de lourds cylindres jusqu'à ce qu'il ramollisse, puis on y incorpore le soufre, les charges et les accélérateurs.

Mettre en forme et cuire. Le mélange est moulé, extrudé ou étalé sur une toile, puis chauffé dans une presse ou un autoclave à vapeur jusqu'à la formation des ponts.

Une comparaison simple, qualitative, montre le changement. Coupez un élastique pour en faire une bande, et taillez une bande de même largeur, épaisseur et longueur dans du crêpe brut, non vulcanisé, vendu pour les travaux manuels (certaines semelles en crêpe sont vulcanisées : vérifiez l'étiquette). Suspendez le même petit

poids à chacune pendant une nuit, retirez-le et attendez dix minutes : l'élastique revient en général presque à sa longueur, tandis que la bande brute tend à rester plus longue. Laissez ensuite les deux une heure au congélateur, réchauffez-les dans de l'eau à 40 °C environ et comparez leur raideur et leur caractère collant. Les produits ne contiennent pas tous les mêmes charges : voyez le résultat comme une tendance.

> **Sécurité.** Ne chauffez pas de soufre et n'essayez pas de vulcaniser du caoutchouc chez vous : les fumées sont toxiques, et le soufre fondu brûle et peut s'enflammer. En usine, les cylindres mélangeurs peuvent écraser et happer les mains, et les presses et autoclaves sont chauds et sous pression : il faut des machines protégées et des opérateurs formés. Le caoutchouc naturel et le latex provoquent des allergies chez certaines personnes : une personne allergique au latex ne doit pas manipuler les échantillons, et les autres porteront des gants en nitrile. Vérifiez la température de l'eau avant d'y plonger les mains.

Histoire et évolution

En Mésoamérique, on travaillait le caoutchouc vers 1600 av. J.-C. On mêlait le latex de Castilla elastica au jus d'une liane de la famille des liserons, qui le rendait plus élastique, et l'on en faisait des balles pesant jusqu'à 7 kg pour un jeu de balle rituel, ainsi que des semelles de sandales et des ligatures. Des observateurs espagnols décrivirent le caoutchouc au XVIe siècle. En Europe et en Amérique du Nord, son usage se répandit au début du XIXe siècle, mais les objets en caoutchouc brut ramollissaient l'été et craquaient l'hiver.

En 1837, Thomas Hancock fit breveter une machine à malaxer le caoutchouc brut, et dans les années 1830 plusieurs chercheurs constatèrent que le soufre le rendait moins collant. Charles Goodyear, quincaillier criblé de dettes, dont les soutiens s'effondrèrent de nouveau avec la crise de 1837, essaya pendant des années toutes sortes de traitements. En 1839, selon son récit, un morceau de caoutchouc mêlé de soufre toucha un poêle chaud et charbonna sur le bord sans fondre. Il lui fallut environ cinq ans pour rendre le procédé fiable. En Grande-Bretagne, Hancock vit en 1842 des échantillons du caoutchouc soufré américain et mit au point son propre procédé ; il déposa un brevet de vulcanisation le 21 novembre 1843, et le brevet américain n° 3 633 de Goodyear suivit le 15 juin 1844. Le nom, tiré de Vulcain, dieu romain du feu, fut proposé par un ami de Hancock, William Brockedon. Goodyear passa des années en procès et mourut en 1860 sans avoir tiré profit de sa découverte.

La demande de pneus, de courroies et d'isolants provoqua une ruée vers le caoutchouc sauvage du bassin amazonien. En 1876, Henry Wickham expédia environ 70 000 graines d'hévéa du Brésil aux jardins de Kew, à Londres, et les jeunes plants furent envoyés dans les colonies britanniques d'Asie. En 1900, les plantations asiatiques produisaient environ 4 tonnes, contre quelque 27 000 tonnes récoltées en Amazonie ; dès 1916, elles fournissaient l'essentiel du caoutchouc mondial. Beaucoup de caoutchoucs synthétiques, tirés plus tard du pétrole, se vulcanisent au soufre à peu près de la même façon ; d'autres, comme le néoprène, sont réticulés par des oxydes métalliques.

Fruit, graines et feuille d'hévéa : chaque capsule renferme trois graines, comme celles que Wickham expédia à Kew en 1876.

Chiffres clés

Caoutchouc travaillé en Mésoamérique
Vers 1600 av. J.-C. ; les balles du jeu rituel pesaient jusqu'à 7 kg

Teneur en caoutchouc du latex frais
Environ 30 à 40 %, le reste surtout de l'eau

Brevet britannique de Hancock
Déposé le 21 novembre 1843

Brevet américain de Goodyear
N° 3 633, 15 juin 1844

Graines d'hévéa expédiées par Wickham
Environ 70 000, du Brésil à Kew en 1876

Sources

1. Charles Goodyear (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/charles-goodyear/
2. Rubber processed in ancient Mesoamerica, MIT researchers find · MIT News https://news.mit.edu/1999/rubber-0714
3. Natural rubber · Transport Information Service (GDV) https://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/kautschuk/naturkautschuk/naturkautschuk.htm
4. The seeds of discord · Revista Pesquisa FAPESP https://revistapesquisa.fapesp.br/en/the-seeds-of-discord/
5. Sulfur vulcanization · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_vulcanization
6. Thomas Hancock (inventor) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Hancock_(inventor)
7. Hevea brasiliensis (rubber tree) fact sheet · EAFRINET, National Museums of Kenya and Lucidcentral https://keys.lucidcentral.org/keys/v3/eafrinet/weeds/key/weeds/Media/Html/Hevea_brasiliensis_%28Rubbertree%29.htm

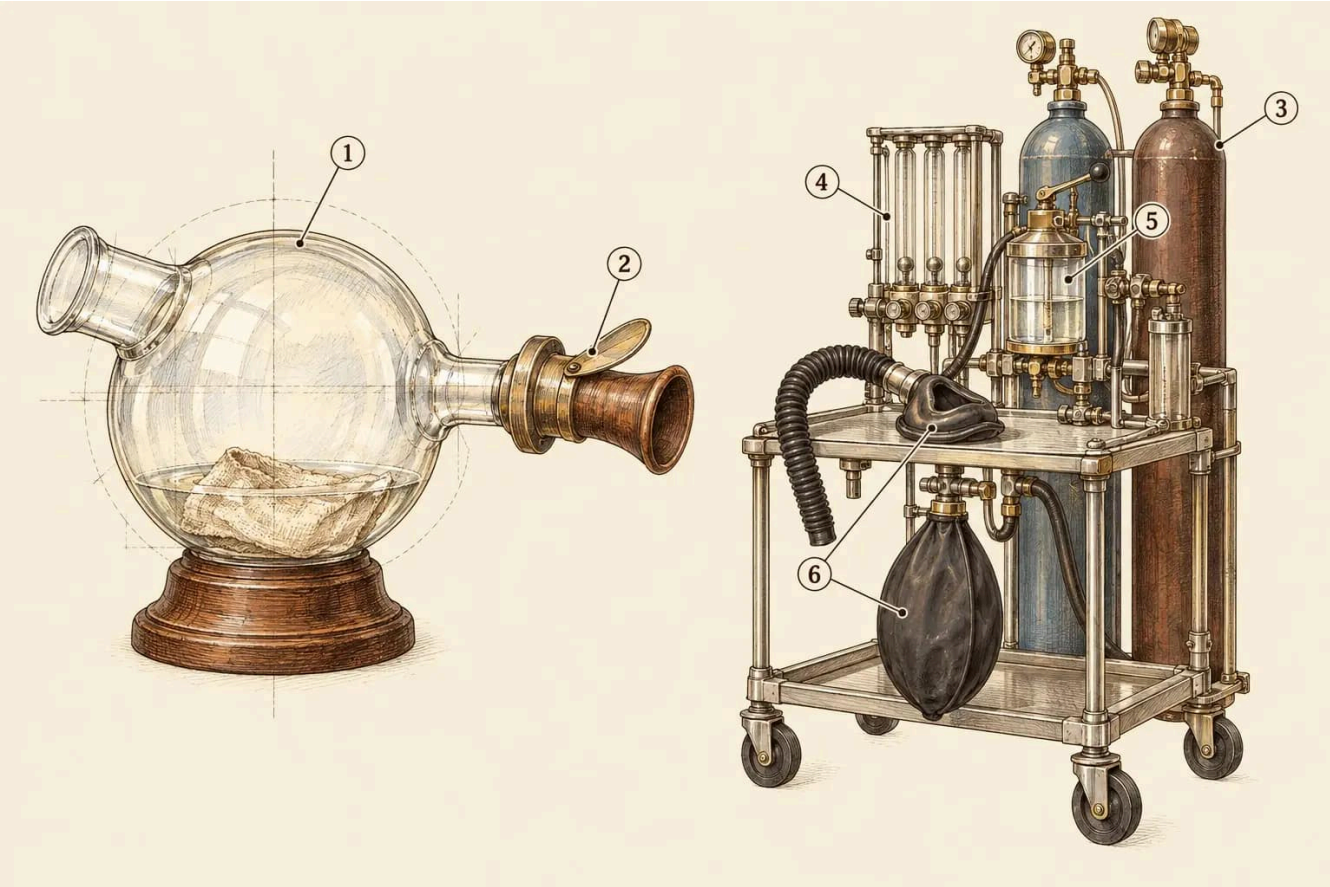
Faits vérifiés le 2026-10-12

Anesthésie

Opérer sans douleur ni conscience

1846 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Hygiène et antisepsie (p. 301), Verre (p. 134)



1 Globe de verre de l'inhalateur à éther de Morton 2 Embout et soupape 3 Bouteilles de gaz 4 Débitmètres en verre 5 Flacon vaporisateur 6 Ballon réservoir et masque

L'anesthésie est la pratique médicale qui supprime la douleur, et souvent la conscience, pour permettre une opération. Depuis une démonstration publique à l'éther à Boston en 1846, des anesthésistes formés, la surveillance et l'oxygène en ont fait un geste courant, et avec l'antisepsie elle a fait de la chirurgie un soin ordinaire plutôt qu'un dernier recours.

Ce que c’est

L’anesthésie supprime la douleur, et dans sa forme générale la conscience aussi, pour qu’un chirurgien puisse opérer. L’anesthésie générale plonge le patient dans une inconscience contrôlée et réversible. L’anesthésie locorégionale endort la sensibilité d’une grande partie du corps, un membre ou tout le bas du corps, alors que le patient reste éveillé. L’anesthésie locale insensibilise une petite zone, de quoi recoudre une plaie ou soigner une dent.

La planche réunit deux appareils. À gauche, l’inhalateur de verre avec lequel William Morton administra l’éther à Boston en 1846. À droite, un appareil d’anesthésie du début du XXe siècle: des bouteilles de gaz comprimé, des

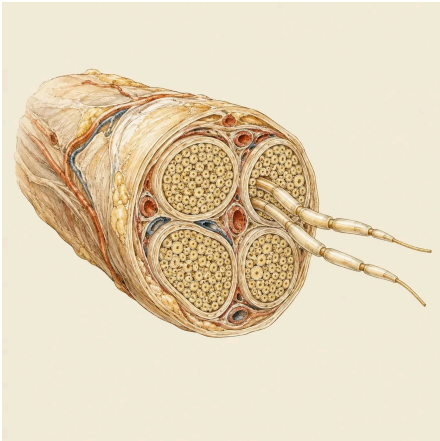
débitmètres en verre, un flacon où le gaz se charge de la vapeur d'un agent volatil, et le ballon et le masque par lesquels respire le patient.

Comment ça marche

Les anesthésiques généraux atteignent le cerveau par le sang, inspirés par les poumons ou injectés dans une veine. Beaucoup renforcent l'effet du GABA, le principal signal de freinage du cerveau, si bien que les neurones s'activent moins. La conscience s'éteint et aucun souvenir ne se forme. Le détail de ce mécanisme reste discuté.

Selon le produit et le patient, cette dépression atteint aussi les centres qui font tourner l'organisme. La respiration peut devenir superficielle ou s'arrêter. Les muscles de la gorge se relâchent, et la langue peut tomber en arrière et boucher les voies aériennes. Les réflexes de toux et de déglutition s'affaiblissent, et le contenu de l'estomac peut remonter jusqu'aux poumons. La tension artérielle baisse souvent. L'anesthésiste maintient donc les voies aériennes ouvertes, donne de l'oxygène, respire souvent à la place du patient par un tube ou un masque, et ajuste les produits minute après minute.

Les anesthésiques locaux agissent sur les nerfs eux-mêmes. Un signal nerveux est une onde électrique qui court le long d'une fibre, portée par des ions sodium qui entrent par de minuscules canaux de sa membrane. Le produit bloque ces canaux : l'onde s'éteint là où il se trouve, et le cerveau ne reçoit plus rien de ce qui est au-delà. Déposé autour d'un nerf, il insensibilise tout le territoire de ce nerf ; dans le liquide qui baigne les racines nerveuses du bas du dos, il endort la moitié inférieure du corps. Les cellules du cœur et du cerveau utilisent le même type de canal, et un excès d'anesthésique local dans le sang peut provoquer des convulsions ou arrêter le cœur.



Un nerf est un câble de milliers de fibres ; l'anesthésique local fait taire chacune de celles qu'il atteint.

Comment on la rend sûre

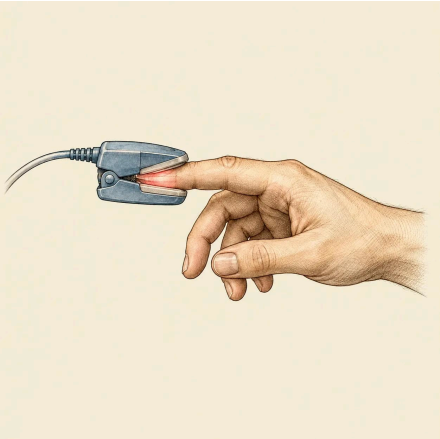
Cette partie décrit l'organisation de l'anesthésie à l'hôpital. Ce n'est pas une méthode à appliquer en dehors.

Une équipe formée. Selon les pays, l'anesthésie est conduite par un médecin formé pendant des années ou par des infirmiers spécialisés. Ils restent auprès du patient du premier produit jusqu'au retour sûr de la respiration et de la conscience.

La consultation préalable. L'équipe s'informe des maladies, des traitements, des allergies et des anesthésies antérieures, examine la bouche, le cou, le cœur et les poumons, et choisit avec le patient entre anesthésie générale, locorégionale ou locale.

L'estomac vide. Avant une opération programmée, le patient cesse de manger quelques heures avant, souvent six environ après un repas léger, ce qui réduit le risque que le contenu de l'estomac passe dans les poumons. L'hôpital fixe les horaires exacts pour chacun.

Le matériel vérifié avant chaque patient. De l'oxygène avec une bouteille de secours, une aspiration, de quoi maintenir les voies aériennes ouvertes, un moyen de ventiler à la main si l'appareil tombe en panne, et les médicaments de réanimation. Un hôpital de campagne travaille avec un matériel plus simple, mais ne peut se passer d'aucun de ces éléments.



La pince fait passer une lumière rouge et infrarouge à travers le doigt et estime la part de l'hémoglobine chargée d'oxygène.

Une surveillance continue. L'oxymètre de pouls affiche la saturation du sang en oxygène. D'autres appareils suivent le rythme cardiaque, la tension et le gaz carbonique de chaque expiration, qui montre que l'air atteint bien les poumons. Aucun ne remplace l'anesthésiste qui regarde son patient.

La liste de contrôle. En 2008, l'Organisation mondiale de la santé a lancé une liste de contrôle de la sécurité chirurgicale. L'équipe marque une pause avant l'anesthésie, pour confirmer le patient, l'opération, les allergies, des difficultés prévisibles pour les voies aériennes et le bon fonctionnement de l'oxymètre, puis avant l'incision et avant que le patient quitte le bloc. Dans une étude menée dans huit hôpitaux, les décès après une chirurgie lourde sont passés de 1,5 % à 0,8 %.

Le réveil. Le patient se réveille en salle de surveillance, où des infirmiers suivent sa respiration, son oxygène, sa douleur et ses nausées. Après une anesthésie générale, quelqu'un doit le raccompagner, et il ne doit pas conduire pendant au moins vingt-quatre heures.

> **Sécurité.** Les gaz et médicaments anesthésiques ne doivent jamais être utilisés hors d'une prise en charge médicale qualifiée. Avec beaucoup de ces produits, la dose qui supprime la conscience n'est pas loin de celle qui arrête la respiration ou les réflexes de protection, et l'écart varie d'une personne à l'autre et d'une minute à l'autre. Sans quelqu'un de formé pour garder les voies aériennes ouvertes et donner de l'oxygène, sans surveillance ni matériel de réanimation, une personne inconsciente peut mourir en quelques minutes. Respirer des gaz ou des solvants pour leurs effets a tué beaucoup de gens, et l'éther est très inflammable. Une personne qui souffre gravement ou doit être opérée doit être conduite à l'hôpital.

Histoire et évolution

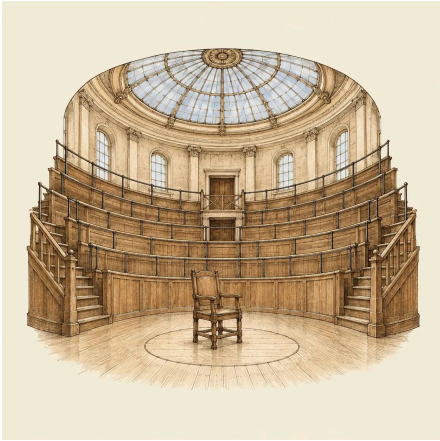
Avant l'anesthésie, les chirurgiens comptaient sur l'alcool, l'opium et la rapidité. Le 13 octobre 1804, au Japon, Hanaoka Seishū retira une tumeur du sein à une femme qui avait avalé son mélange de plantes. Le Japon était alors fermé au monde, et ses travaux restèrent inconnus à l'étranger.

En 1800, Humphry Davy suggéra que le protoxyde d'azote pourrait servir en chirurgie. En décembre 1844, le dentiste Horace Wells se fit arracher une dent sous ce gaz, mais sa démonstration à Boston, en janvier 1845, échoua quand le patient cria. En Géorgie, Crawford Long avait opéré sous éther dès le 30 mars 1842, mais il ne publia qu'en 1849.

La planche retient la date du 16 octobre 1846. Au Massachusetts General Hospital, Morton fit respirer de l'éther à Gilbert Abbott pendant que le chirurgien John Collins Warren lui retirait une tumeur du cou. La nouvelle circula vite, et en quelques mois l'éther était employé en Europe. À Édimbourg, James Young Simpson essaya le chloroforme le 4 novembre 1847 : il agissait plus vite et ne brûlait pas, mais la marge entre assez et trop était étroite. John Snow en étudia les doses et l'administra en 1853 à la reine Victoria pour la naissance du prince Léopold. L'anesthésie permit des opérations plus longues, mais les plaies s'infectaient toujours, jusqu'à l'antisepsie, à la fin des années 1860.

En 1884, Carl Koller montra que la cocaïne insensibilisait l'œil, et en 1898 August Bier pratiqua à Kiel la première rachianesthésie. La cocaïne était toxique et addictive, et des produits de synthèse plus sûrs suivirent : la procaïne en 1905, la lidocaïne dans les années 1940. Le XXe siècle apporta les anesthésiques intraveineux et les curares,

l’intubation devint courante, et l’oxymétrie de pouls, décrite par Takuo Aoyagi en 1974, se répandit dans les blocs opératoires dans les années 1980.



On enseignait la chirurgie dans des amphithéâtres en gradins, comme celui de Boston appelé aujourd’hui Ether Dome.

Chiffres clés

Le jour de l'éther
16 octobre 1846, Massachusetts General Hospital, Boston

La cocaïne sur l'œil
Communication de Koller lue à Heidelberg le 15 septembre 1884

Liste de contrôle de l'OMS
19 points ; dans huit hôpitaux pilotes, décès passés de 1,5 % à 0,8 % (2009)

L'opération de Hanaoka
13 octobre 1804, Japon, sous un anesthésique pris par la bouche

Oxymétrie de pouls
Principe décrit par Takuo Aoyagi en 1974

Sources

1. Ether & Ether Dome History · Massachusetts General Hospital, Treadwell Virtual Library https://libguides.massgeneral.org/mghhistory/ether
2. Crawford Long (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/crawford-long
3. The surprising and long story of the first use of ether in surgery · The Conversation https://theconversation.com/the-surprising-and-long-story-of-the-first-use-of-ether-in-surgery-113340
4. Horace Wells (1815–1848) and William TG Morton (1819–1868): pioneers in anaesthesiology · South African Dental Journal, vol. 75 no. 2 (2020) https://scielo.org.za/pdf/sadj/v75n2/11.pdf
5. Davy, Researches, chemical and philosophical, chiefly concerning nitrous oxide (1800) · Heirs of Hippocrates, University of Iowa Libraries https://heirs.lib.uiowa.edu/record.php?id=1338.5
6. History of the Japanese Society of Anesthesiologists · Japanese Society of Anesthesiologists https://anesth.or.jp/users/english/about_jsa/history
7. A great leap forward: James Young Simpson · Royal College of Surgeons of Edinburgh https://archiveandlibrary.rcsed.ac.uk/special-collections/the-battle-for-midwifery/a-great-leap-forward-james-young-simpson
8. John Snow: anesthesia · UCLA Fielding School of Public Health https://epi-snow.ph.ucla.edu/Stream4_Snowlife_d.html
9. Cocaine: what is the crack? A brief history of the use of cocaine as an anesthetic · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4335732/
10. Cocaine and self-experimentation · Association of Anaesthetists, Heritage Centre https://anaesthetists.org/Home/Heritage-centre/Learning/Heritage-Centre-blog-celebrating-75-years-of-Anaesthesia/Cocaine-and-Self-experimentation-a-blog-post-from-the-Heritage-Centre
11. Sodium channels and local anesthetics: old friends with new perspectives (Körner et al., 2022) · Frontiers in Pharmacology https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2022.837088/full
12. How general anesthetics work (Hibbs lab, Nature 2020) · UT Southwestern Medical Center https://www.utsouthwestern.edu/ctplus/stories/2020/general-anesthetics-benzos.html
13. General anaesthesia · NHS https://www.nhs.uk/conditions/general-anaesthesia/
14. Local anaesthesia · NHS https://www.nhs.uk/conditions/local-anaesthesia/
15. Pulse oximetry, Takuo Aoyagi memorial issue (Journal of Anesthesia, 2021) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8327306/
16. Safe surgery: tools and resources · World Health Organization https://www.who.int/teams/integrated-health-services/patient-safety/research/safe-surgery/tool-and-resources
17. RCSI endorses the World Health Organisation's second Global Patient Safety Challenge (June 2008) · RCSI University of Medicine and Health Sciences https://www.rcsi.com/dublin/news-and-events/news/news-article/2008/06/rcsi-endorses-the-world-health-organisations-second-global-patient-safety-challenge
18. Implementation manual: WHO surgical safety checklist 2009 · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/9789241598590
19. Simple surgical checklist cuts deaths 40 percent · Harvard Medical School https://hms.harvard.edu/news/simple-surgical-checklist-cuts-deaths-40-percent

Faits vérifiés le 2026-10-14

Hygiène et antisepsie

Couper la route aux microbes

1847 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Savon (p. 95), Microscope (p. 216), Eau potable (p. 35), Distillation (p. 176)

Mène à: Anesthésie (p. 296), Pénicilline (p. 359)

1 Cuvette et broc 2 Chaudière du pulvérisateur phéniqué 3 Buse et brouillard phéniqué
4 Couvercle boulonné, manomètre et soupape 5 Panier d'instruments dans la vapeur 6 Brûleur sous l'autoclave

L'hygiène et l'antisepsie coupent les chemins que prennent les microbes d'une personne à l'autre: les mains, les instruments, les pansements et l'eau. Le lavage au savon, l'eau tenue à l'écart des eaux usées, les produits qui tuent les germes sur les plaies et la chaleur qui stérilise les outils ont rendu l'accouchement et la chirurgie bien plus sûrs dans la seconde moitié du XIXe siècle.

Ce que c'est

Les microbes passent d'une personne à l'autre par des chemins que personne ne voit: une main qui a touché un malade puis une plaie, un bistouri essuyé sur un tablier, une eau puisée en aval d'une latrine. L'hygiène et l'antisepsie sont les gestes et les outils qui coupent ces chemins. Le savon et l'eau enlèvent les germes. La chaleur et certains produits les tuent. L'asepsie, au sens des chirurgiens, les empêche d'atteindre la plaie dès le départ.

La planche réunit trois étapes de cette idée: la cuvette placée à l'entrée d'une salle d'accouchement de Vienne en 1847, le pulvérisateur d'acide phénique dont Joseph Lister se servait dans les années 1870, et l'autoclave à

vapeur qui, à partir des années 1880, a stérilisé instruments et pansements par la chaleur plutôt que par des produits chimiques.

Comment ça marche

Une bactérie est une cellule unique longue de quelques millièmes de millimètre ; un virus est bien plus petit et ne se multiplie qu'à l'intérieur de cellules vivantes. Les uns comme les autres voyagent sur la peau, dans les gouttelettes, la poussière, les aliments, l'eau ou sur les outils, et les selles en contiennent des quantités énormes. Une infection demande une source, un transporteur et une porte d'entrée, comme la bouche ou une plaie. Se laver les mains entre deux malades supprime le transporteur, et le germe s'arrête là.

Le savon agit surtout en emportant les microbes. Chaque molécule de savon s'accroche à l'eau par un bout et au gras par l'autre ; elle décolle donc le film gras de la peau, avec les microbes qui y sont pris, et l'entraîne dans le rinçage. Elle fait aussi éclater les virus entourés d'une enveloppe grasse, comme celui de la grippe.

Frotter doigts entrelacés atteint la peau entre les doigts, l'un des endroits les plus souvent oubliés.

La chaleur tue en dépliant pour de bon les protéines du microbe, comme elle fait prendre un blanc d'œuf. Une ébullition franche tue les bactéries ordinaires, les virus et les parasites. Certaines bactéries, dont celles du tétanos et du botulisme, peuvent se replier en spores dont la coque résiste à l'ébullition. La vapeur sous pression d'un autoclave, maintenue à 121 °C ou plus assez longtemps et au contact de toutes les surfaces, les détruit aussi : c'est la stérilisation au sens strict.

Les antiseptiques s'emploient sur les tissus vivants, les désinfectants sur les objets. L'alcool déplie les protéines, et les solutions hydroalcooliques en contiennent pour cette raison au moins 60 %. Les composés chlorés, comme le chlorure de chaux employé à Vienne ou l'eau de Javel d'aujourd'hui, oxydent tout ce qu'ils touchent dans la cellule. L'acide phénique de Lister tuait les germes mais abîmait aussi les tissus des opérés et les mains des chirurgiens ; on l'a abandonné. La saleté et le sang protègent les germes de tous ces produits : on nettoie donc toujours d'abord.

Comment s'y prendre

Il s'agit ici de gestes quotidiens recommandés par les autorités de santé publique, et non d'actes médicaux.

Se laver les mains correctement. Mouillez-les à l'eau propre, courante ou versée, puis faites mousser le savon. Frottez paume contre paume, chaque paume sur le dos de l'autre main en entrelaçant les doigts, de nouveau paume contre paume doigts entrelacés, le dos des doigts, chaque pouce tourné dans la paume opposée, puis le bout des doigts dans la paume. La séquence de l'OMS dure 40 à 60 secondes ; les CDC américains demandent au moins 20 secondes de frottement. Rincez, puis séchez avec une serviette propre ou à l'air.

Savoir quand. Après les toilettes ou un change, avant de cuisiner et de manger, avant et après avoir soigné un malade ou une plaie, et après avoir touché des animaux ou des ordures.

Séparer l'eau et les déchets. Creusez les latrines en contrebas de tout puits ou source et à au moins 30 m, davantage dans le gravier ou la roche fissurée, avec le fond de la fosse au moins 1,5 m au-dessus du niveau le plus haut de la nappe à la saison des pluies. Ces distances sont un point de départ : faites vérifier le terrain et le sens d'écoulement de la nappe par le service local de santé ou de l'eau.

Comptez les vingt minutes à partir des gros bouillons, sans plus rien ajouter ensuite.

Faire bouillir outils et linges. Lavez d'abord au savon ciseaux, pinces et linges, car la chaleur traverse mal le sang séché et le gras. Couvrez-les d'eau dans une marmite munie d'un couvercle, portez à gros bouillons et comptez 20 minutes à partir de là, sans rien ajouter. Laissez refroidir, sortez les objets avec une pince bouillie en même temps et placez-les aussitôt dans une boîte à couvercle bouillie elle aussi. Ils servent à retirer une écharde ou à couper un pansement. L'ébullition désinfecte mais ne stérilise pas : aiguilles et tout ce qui pénètre dans le corps doivent venir stériles et scellés d'une pharmacie ou d'un centre de soins.

Nettoyer une petite coupure. Lavez-vous les mains, puis rincez la coupure à l'eau du robinet propre ou à l'eau bouillie refroidie jusqu'à ce qu'il ne reste aucune saleté, et lavez la peau autour au savon. Séchez en tamponnant et couvrez d'un pansement stérile ou d'un pansement adhésif de pharmacie.

> **Sécurité.** Ne fabriquez ni antiseptique ni désinfectant chez vous, et ne mélangez jamais des produits ménagers : l'eau de Javel mêlée à un acide ou à l'ammoniaque dégage un gaz toxique. Rien de ce qui est décrit ici ne doit être avalé ni injecté. L'eau bouillante et la vapeur brûlent : tenez les enfants loin de la marmite. Appelez les secours pour un saignement qui ne s'arrête pas ou une coupure très profonde. Consultez rapidement pour une coupure béante ou longue, une brûlure, toute morsure d'animal ou humaine, une plaie souillée de terre, et si une plaie devient rouge, gonflée ou plus douloureuse, suinte du pus ou s'accompagne de fièvre. Un rappel antitétanique peut être nécessaire.

Histoire et évolution

À la maternité de Vienne, la clinique où se formaient les étudiants en médecine perdait environ une mère sur dix de la fièvre puerpérale, celle des sages-femmes environ une sur trente. En mars 1847, Jakob Kolletschka, collègue du jeune médecin Ignaz Semmelweis, meurt d'une coupure reçue pendant une autopsie, avec les mêmes signes que les accouchées. Semmelweis en conclut que les étudiants portent des « particules cadavériques » de la salle d'autopsie à la salle de travail. À partir de mai 1847, date que retient cette planche, il leur impose de se laver les mains au chlorure de chaux, et en 1848 la mortalité de sa clinique tombe à 1,27 %. Beaucoup de ses confrères rejettent son explication.

En 1854, John Snow relie une épidémie de choléra londonienne à une seule pompe de rue. À l'hôpital militaire de Scutari, où Florence Nightingale soigne les blessés, la mortalité des soldats admis atteint 42 % en février 1855, puis chute une fois les égouts réparés et les salles aérées.

Au début des années 1860, Louis Pasteur montre qu'un bouillon bouilli dans un ballon à long col recourbé reste limpide, alors qu'un bouillon exposé à la poussière se gâte : ce sont des germes vivants qui causent la putréfaction. À Glasgow, Joseph Lister en déduit que des germes font aussi suppurer les plaies. En août 1865, il panse à l'acide phénique la fracture ouverte de la jambe d'un garçon, qui guérit sans infection ; il publie sa méthode en 1867. Parmi ses amputés, les décès passent de 16 sur 35 à 6 sur 40, des effectifs qu'il reconnaissait lui-même trop petits.

Charles Chamberland, collaborateur de Pasteur, conçoit en 1879 une étuve à vapeur, et en 1886 Ernst von Bergmann, à Berlin, passe aux pansements stérilisés à la vapeur. Les chirurgiens tiennent désormais les germes hors de la plaie avec des instruments et des blouses stérilisés, puis, à partir des années 1890, des gants de caoutchouc. Les recommandations de l'OMS de 2009 sur l'hygiène des mains fixent cinq moments où un soignant doit se nettoyer les mains.

Le ballon à col de cygne de Pasteur : la poussière piégée dans la courbe n'atteint jamais le bouillon, qui reste limpide.

Chiffres clés

Lavage des mains à Vienne

À partir de mai 1847 ; la mortalité de la clinique des médecins passe d'environ 10 % (1840-1846) à 1,27 % en 1848

Hygiène des mains (OMS)

40 à 60 s à l'eau et au savon, 20 à 30 s avec une solution hydroalcoolique

Ébullition des outils

20 min à gros bouillons désinfectent, mais ne tuent pas à coup sûr les spores bactériennes

Amputations de Lister

16 décès sur 35 cas avant l'antisepsie, 6 sur 40 après

Stérilisation à la vapeur (CDC)

Matériel emballé : 121 °C pendant au moins 30 min dans un stérilisateur à déplacement d'air par gravité, ou 132 °C pendant 4 min avec prévide

Sources

1. Ignaz Phillip Semmelweis' studies of death in childbirth (I. Loudon, Journal of the Royal Society of Medicine, 2013) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3807776
2. Pioneering Hand Hygiene: Ignaz Semmelweis and the Fight Against Puerperal Fever (Cureus, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11568873/
3. Joseph Lister (1827-1912): A Pioneer of Antiseptic Surgery (Cureus, 2022) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9854334/
4. Statistics and the British controversy about the effects of Joseph Lister's system of antisepsis for surgery, 1867-1890 (U. Tröhler) · James Lind Library https://www.jameslindlibrary.org/articles/statistics-and-the-british-controversy-about-the-effects-of-joseph-listers-system-of-antisepsis-for-surgery-1867-1890/
5. Charles Chamberland, l'inventeur d'outils de stérilisation · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/fr/institut-pasteur/notre-histoire/charles-chamberland-inventeur-outils-sterilisation
6. Bergmann, Ernst von · Deutsche Biographie https://www.deutsche-biographie.de/pnd118656104.html
7. Florence Nightingale: the Lady with the Lamp · National Army Museum https://www.nam.ac.uk/explore/florence-nightingale-lady-lamp
8. John Snow, cholera and the Broad Street pump · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/london-stories/john-snow-cholera-broad-street-pump/
9. Hand Hygiene: Why, How & When? · World Health Organization https://www.afro.who.int/sites/default/files/2017-06/Hand_Hygiene_Why_How_and_When_Brochure.pdf
10. About handwashing · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/clean-hands/about/index.html
11. Handwashing facts · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/clean-hands/data-research/facts-stats
12. Steam sterilization · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/infection-control/hcp/disinfection-sterilization/steam-sterilization.html
13. Clostridium botulinum · AGES, Austrian Agency for Health and Food Safety https://www.ages.at/en/human/disease/pathogens-from-a-to-z/clostridium-botulinum
14. A Community Guide to Environmental Health: Disinfecting with heat · Hesperian Health Guides https://en.hesperian.org/hhg/A_Community_Guide_to_Environmental_Health:Disinfecting_with_Heat
15. Excreta, pit for stools and vomit · Médecins Sans Frontières https://medicalguidelines.msf.org/en/viewport/CHOL/english/appendix-14-excreta-pit-stools-and-vomit-32409860.html
16. Cuts and grazes · NHS https://www.nhs.uk/conditions/cuts-and-grazes/

Faits vérifiés le 2026-10-14

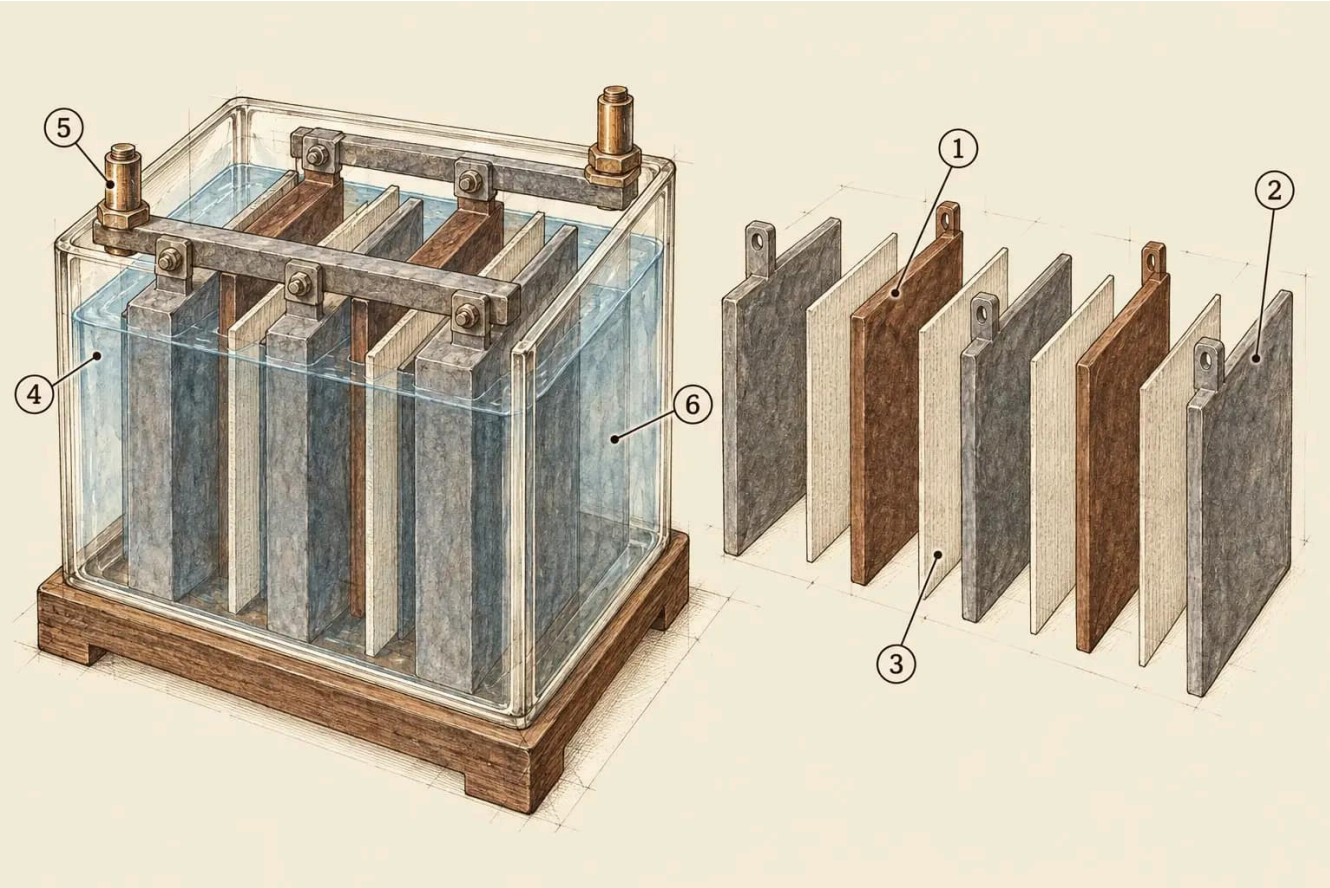
Accumulateur au plomb

Le courant mis en réserve

1859 · Âge industriel · Science & industrie

Nécessite: Pile électrique (p. 242), Générateur électrique (p. 276)

Mène à: Éolienne (p. 342)



1 Plaque positive (dioxyde de plomb) 2 Plaque négative (plomb spongieux) 3 Séparateur 4 Électrolyte (acide sulfurique dilué) 5 Barrette de plomb et borne 6 Bac en verre

Un accumulateur au plomb stocke l'électricité dans des plaques de plomb et de dioxyde de plomb plongées dans de l'acide sulfurique dilué, la restitue sous forme de courant et se recharge des centaines de fois. Gaston Planté a construit le premier élément en 1859; les plaques empâtées de Camille Faure en ont fait un produit industriel en 1881, et il fait encore démarrer la plupart des voitures du monde.

Ce que c'est

Un accumulateur au plomb met l'électricité en réserve sous forme chimique et la rend en courant, des centaines de fois de suite. Chaque élément contient des plaques de plomb dans de l'acide sulfurique dilué et fournit environ deux volts. Une batterie de voiture réunit six éléments en série dans un même bac, soit douze volts.

Le physicien français Gaston Planté construit en 1859 le premier élément rechargeable: on le recharge en y renvoyant du courant. En 1881, Camille Faure change la préparation des plaques en les enduisant d'oxyde de

plomb, si bien que les éléments sont prêts plus vite et peuvent sortir d'une usine. La réaction à l'intérieur reste celle de Planté.

Comment ça marche

Les plaques positives (1) portent du dioxyde de plomb, une poudre brun foncé. Les plaques négatives (2) portent du plomb spongieux, gris et criblé de pores pour que l'acide atteigne le plus de métal possible. Des séparateurs (3) les isolent, et l'électrolyte (4), de l'acide sulfurique étendu d'eau, remplit les interstices.

Une plaque empâtée : la pâte d'oxyde de plomb est pressée dans une grille de plomb coulé qui la tient en place.

À la décharge, le plomb et le dioxyde de plomb des plaques réagissent avec l'acide et se changent en sulfate de plomb, tandis que les grilles de plomb conduisent le courant. Les électrons quittent la plaque négative et rejoignent la positive par le circuit extérieur, où ils alimentent la lampe ou le moteur. La réaction consomme de l'acide et produit de l'eau : l'électrolyte s'appauvrit à mesure que l'élément se vide. Dans une batterie de démarrage, sa densité passe d'environ 1,265 à environ 1,12.

La charge fait tourner la réaction à l'envers. Le courant d'une génératrice, d'un panneau solaire ou d'un chargeur branché sur le secteur reforme le plomb et le dioxyde de plomb, et l'acide retourne dans le liquide. En fin de charge, il reste peu de sulfate, et une partie du courant décompose l'eau : l'hydrogène se dégage des plaques négatives, l'oxygène des positives. D'où la perte d'eau des batteries ouvertes et l'aération des locaux de charge.

La capacité se compte en ampères-heures (Ah) : une batterie de 60 Ah fournit 3 A pendant une vingtaine d'heures, la durée habituelle de référence, et moins si on la vide plus vite. Le sulfate laissé des semaines sur une plaque déchargée peut grossir en cristaux durs qu'une charge ordinaire ne défait plus forcément, et les décharges profondes usent la matière active. Dans une comparaison de Battery University, une batterie de démarrage vidée entièrement à chaque fois tenait 12 à 15 cycles, contre 130 à 150 quand on n'en tirait que 30 %.

Comment s'y prendre

Fabriquer des éléments oblige à manier plomb fondu et acide concentré : cette partie traite donc du choix, de la charge et de l'entretien d'une batterie achetée.

Dimensionner selon la consommation. Un chalet allume chaque jour trois lampes LED de 5 W pendant cinq heures et une radio de 10 W pendant trois heures : 75 + 30 = 105 wattheures, soit environ 9 Ah sous 12 V. Prévoyez deux jours sans recharge (18 Ah) et n'utilisez pas plus de la moitié de la capacité : il faut au moins 36 Ah. Prenez une batterie à décharge profonde de 40 à 50 Ah : le froid réduit aussi la capacité.

Charger à la bonne tension. Employez un chargeur prévu pour la tension et le type de la batterie (ouverte, AGM ou gel) et suivez le profil de charge du fabricant. Vers 25 °C, une batterie ouverte de 12 V se charge en général jusqu'à 13,8 à 14,7 V selon le modèle, puis se maintient vers 13,5 V ; un bon chargeur ajuste la tension de charge à la température de la batterie. Avec un panneau solaire, intercalez un régulateur de charge entre panneau et batterie. Quelle que soit la source de charge, placez près de la borne positive un fusible adapté au câble et protégez chaque circuit qui alimente un appareil. Rechargez peu après chaque usage ; ne chargez jamais une batterie gelée.

Mesurer l'état de charge. Laissez la batterie débranchée reposer au moins quatre heures, idéalement une journée, puis mesurez sa tension. À titre d'exemple, une batterie de démarrage à 26 °C, après un jour de repos, donne environ 12,65 V pleine et environ 11,9 V vide ; chaque modèle diffère, d'où le tableau du fabricant. Sur une

On presse la poire, on aspire l'acide d'un élément et on regarde la hauteur du flotteur : plus l'acide est dense, plus l'élément est chargé.

batterie ouverte, un pèse-acide mesure chaque élément : sur cette même batterie, environ 1,265 pleine et environ 1,12 vide.

Compléter à l'eau distillée seulement. Ajoutez de l'eau distillée jusqu'au repère après la charge, une fois la batterie refroidie ; si les plaques sont découvertes avant la charge, versez juste de quoi les recouvrir. N'ajoutez jamais d'acide. Les batteries étanches AGM et gel n'ont pas besoin d'eau.

Nettoyer, stocker, recycler. Brossez le dépôt des bornes avec de l'eau additionnée de bicarbonate de soude, sans en faire entrer dans les éléments, puis séchez et graissez les bornes. Stockez une batterie chargée, au frais et au sec ; contrôlez sa tension environ une fois par mois et rechargez-la avant qu'elle tombe sous 12,3 V environ, ou sous le seuil du fabricant, et au moins tous les six mois. Rapportez une batterie usagée à un vendeur ou à un point de collecte.

> **Sécurité.** L'acide de batterie brûle la peau et les yeux : portez des lunettes de protection et des gants résistant aux acides. En cas d'éclaboussure, rincez à l'eau courante pendant au moins 30 minutes et consultez un médecin. La charge dégage de l'hydrogène, qu'une étincelle ou une flamme peut enflammer : chargez dans un endroit aéré, ne fumez jamais à proximité et coupez le chargeur avant de poser ou d'enlever ses pinces. Sur une voiture, débranchez en premier le câble relié à la carrosserie (le négatif sur presque toutes les voitures) et rebranchez-le en dernier. Un court-circuit fait passer des centaines d'ampères et peut faire fondre une clé : utilisez des outils isolés et retirez bagues et montre. Une batterie de voiture peut peser 15 kg ou plus : gardez-la droite et pliez les jambes pour la soulever. Le plomb est toxique : lavez-vous les mains après manipulation, ne brûlez jamais une batterie et n'en ouvrez jamais le bac (sur une batterie ouverte, on ne retire que les bouchons de remplissage), et tenez-la hors de portée des enfants.

Histoire et évolution

Planté présenta ses éléments à l'Académie des sciences en 1860 : des feuilles de plomb séparées par des bandes de caoutchouc dans de l'acide dilué, « formées » en inversant le courant encore et encore jusqu'à ce que leur surface devienne poreuse.

Tant que la charge consommait des piles, les accumulateurs restèrent dans les laboratoires ; la dynamo changea la donne dans les années 1870. La pâte de Faure remplaça des mois de formation par une seule charge d'une soixantaine d'heures. Les centrales électriques des années 1880 et 1890 gardaient des batteries en parallèle sur leur réseau pour passer la pointe du soir. Vers 1893, les centraux téléphoniques se mirent à alimenter les lignes des abonnés à partir d'une batterie centrale.

Des rangées d'éléments en verre soutenaient les centrales d'éclairage et les centraux téléphoniques pendant les pointes et les pannes.

Vers 1900, les voitures électriques, pour la plupart au plomb, représentaient environ un tiers des véhicules sur les routes américaines. Le démarreur électrique de Charles Kettering, monté sur la Cadillac de 1912, supprima la manivelle ; à mesure qu'il gagna les autres marques, la batterie de démarrage devint un équipement de série. Aux États-Unis, environ 99 % des batteries au plomb sont recyclées, et les neuves contiennent plus de 80 % de matière recyclée.

Chiffres clés

Tension d'un élément

Environ 2,1 V au repos, chargé ; six éléments en série font une batterie de 12 V

Tension de charge

2,30 à 2,45 V par élément, puis environ 2,25 V par élément pour le maintenir plein

Densité de l'acide

Environ 1,265 chargé, environ 1,12 déchargé (batterie de démarrage, après 24 heures de repos)

Recyclage

99 % des batteries au plomb recyclées aux États-Unis (étude de la profession, données jusqu'en 2018)

Sources

1. Accumulator (1911 Encyclopædia Britannica) · Encyclopædia Britannica, 11th edition, via Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/1911_Encyclop%C3%A6dia_Britannica/Accumulator
2. One of the First Rechargeable Batteries, about 1860 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co36401/one-of-the-first-rechargeable-batteries-about-1860-lead-acid-rechargeable-batteries
3. Planté Battery – 1859 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/plante-battery-1859/
4. BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work
5. BU-403: Charging Lead Acid · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid
6. BU-903: How to Measure State-of-charge · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge
7. BU-804b: Sulfation and How to Prevent it · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-804b-sulfation-and-how-to-prevent-it
8. Battery Charging – Industrial Lead-Acid Batteries · Canadian Centre for Occupational Health and Safety https://ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/battery-charging.html
9. Charging safely · Safety+Health, National Safety Council (NIOSH advice) https://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/charging-safely-2
10. Lead Battery Industry Issues New National Recycling Rate Study · Battery Council International https://batterycouncil.org/news/lead-battery-industry-issues-new-national-recycling-rate-study/
11. The History of the Electric Car · U.S. Department of Energy https://www.energy.gov/articles/history-electric-car
12. Switches, PBXs and Central Offices, chapter 12: power plants · TelephoneTribute.com https://www.telephonetribute.com/switches_survey_chapter_12.html
13. Lead poisoning and health · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health
14. Lead–acid battery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery

Faits vérifiés le 2026-10-14

V

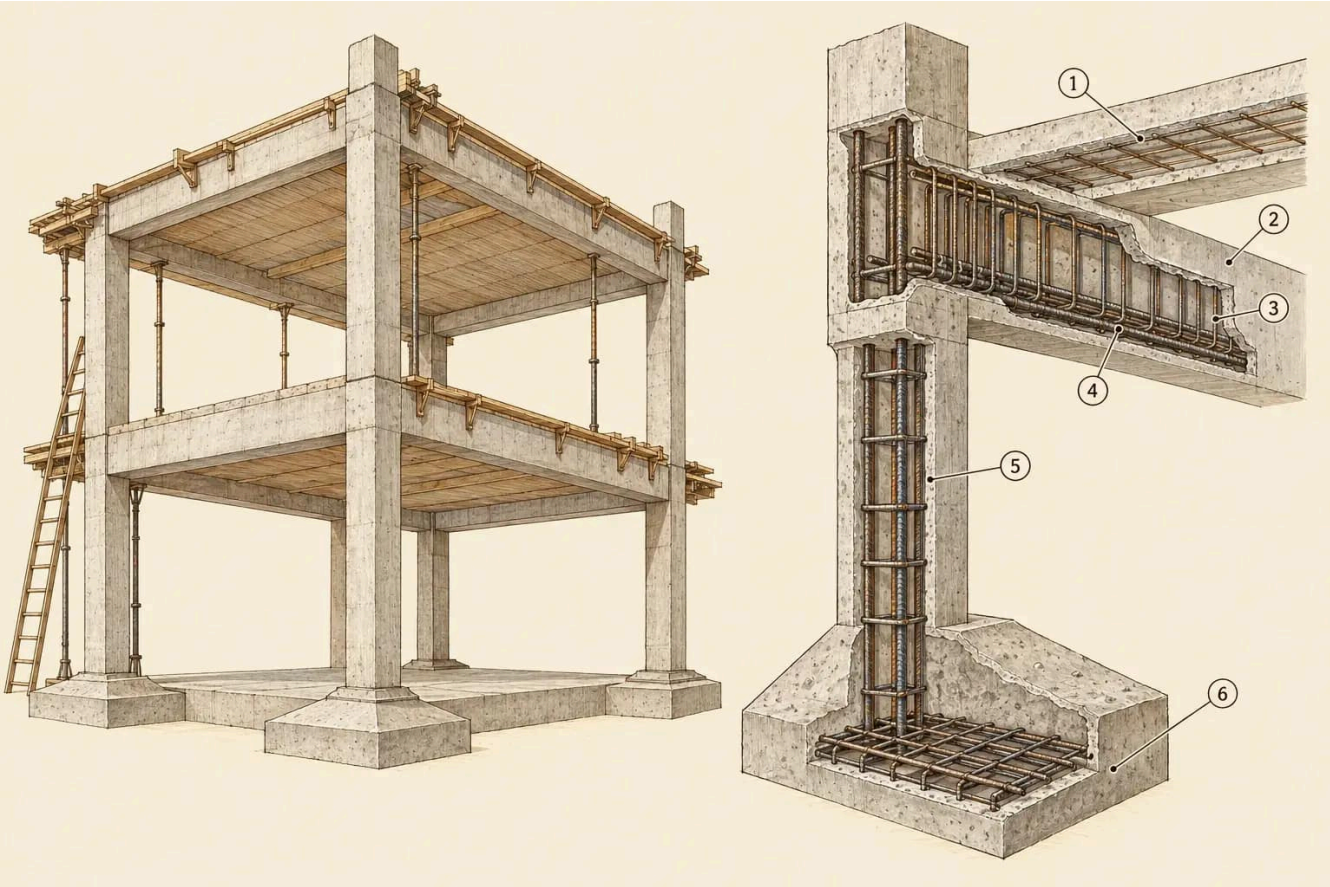
Âge électrique

Béton armé

L'acier en traction, le béton en compression

v. 1848 · Âge industriel · Âge électrique

Nécessite : Ciment Portland (p. 259), Acier (p. 142)



1 Dalle de plancher 2 Poutre 3 Étriers 4 Armatures principales dans la face tendue 5 Poteau et ses cadres 6 Semelle de fondation

Le béton armé est un béton dans lequel sont noyées des barres d'acier, placées là où la pièce sera tirée. Le béton reprend la compression et l'acier la traction : une poutre ou une dalle plate peut ainsi franchir une ouverture là où le béton seul ou la pierre se fendraient.

Ce que c'est

Le béton résiste très bien à l'écrasement et très mal quand on le tire : sa résistance à la traction vaut environ le dixième de sa résistance à la compression. Une poutre en béton seul se fissure, comme un linteau de pierre, sur sa face inférieure tendue sous une charge modeste. C'est pourquoi les bâtisseurs romains franchissaient les vides avec des arcs, des voûtes et des coupoles, des formes qui travaillent presque entièrement en compression.

Le béton armé place de l'acier là où la pièce s'allonge. Les barres logées en bas d'une poutre reprennent la traction, le béton situé au-dessus la compression. Le couple se coule en dalles, poutres, poteaux, semelles, murs, réservoirs et ponts.

Comment ça marche

Sous la charge, une poutre fléchit : le dessus se raccourcit, le dessous s'allonge et s'ouvre en fissures fines comme des cheveux, et dès lors ce sont les barres du bas qui tiennent. Au-dessus des appuis intermédiaires d'une poutre continue, et dans un porte-à-faux, la face tendue est en haut : les armatures principales passent alors en haut. Une dalle portée sur ses quatre côtés fléchit dans les deux sens et reçoit un treillis ; une dalle qui porte dans un seul sens reçoit quand même des barres plus légères en travers, contre les fissures de retrait. Près des appuis, la poutre a aussi tendance à se fendre en biais ; des boucles fermées de barre plus fine, les étriers, traversent ces fissures et y sont resserrées. Les poteaux sont surtout comprimés, et des cadres autour de leurs barres verticales empêchent celles-ci de s'écarter vers l'extérieur.

L'association tient pour trois raisons. L'acier et le béton se dilatent presque autant à la chaleur, de l'ordre de 10 à 12 millionièmes par degré Celsius. Les nervures laminées sur les barres modernes s'accrochent au béton et transmettent l'effort de l'un à l'autre. Enfin, l'eau des pores du béton est très alcaline, vers pH 12,5 à 13, ce qui couvre l'acier d'une fine pellicule d'oxyde qui arrête la rouille.

Cette protection dure autant que l'enrobage, le béton situé à l'extérieur des barres. Le gaz carbonique de l'air le neutralise lentement par carbonatation, et le sel de mer ou de déneigement y fait entrer des chlorures. Quand l'un ou l'autre atteint l'acier en quantité suffisante, en présence d'humidité et d'oxygène, la barre rouille. La rouille occupe plusieurs fois le volume de l'acier qu'elle remplace : elle fissure l'enrobage et le fait éclater par plaques. Ces épaufrures commencent là où l'enrobage est mince ou poreux. Le code américain ACI 318 demande environ 38 mm d'enrobage sur les petites barres à l'extérieur, et 75 mm pour un béton coulé contre la terre.

La rouille gonfle en se formant et fait sauter le béton trop mince au-dessus de la barre.

Le béton précontraint va plus loin : des fils d'acier à haute résistance, tendus puis ancrés dans le béton, compriment la pièce à l'avance. Sous la charge, sa face inférieure ne subit que peu ou pas de traction, ce qui permet des poutres plus longues et plus minces.

Comment le fabriquer

Il s'agit ici d'un petit linteau préfabriqué, pour une ouverture de 0,9 m au plus dans un muret de jardin, sous quelques rangs de blocs seulement, sans plancher ni toiture. Tout élément qui porte des personnes ou une partie de bâtiment, linteau de maison compris, ou dont la chute pourrait blesser quelqu'un, doit être calculé par un ingénieur selon les règles locales, ou acheté sous forme de produit certifié.

Faire le moule. Sur un sol plan, visser des planches en une caisse ouverte de 1,2 m de long et de 150 × 150 mm de section intérieure, pour que le linteau porte de 150 mm à chaque bout. Huiler les faces intérieures et caler les côtés avec des piquets pour que le béton frais ne les écarte pas.

Placer l'acier. Couper deux barres nervurées de 10 mm à 1,1 m, ce qui laisse 50 mm de béton à chaque bout. Les poser sur des cales en plastique de 40 mm, à 40 mm des côtés, et les y ligaturer au fil de fer pour qu'elles ne bougent pas. Prendre des barres entières. Sur de plus grands ouvrages, on prolonge les barres en les faisant chevaucher sur une longueur fixée par le calcul, au moins 500 mm dans les dallages de maisons australiens.

Couler, serrer et faire durcir. Gâcher le béton comme pour le ciment Portland, avec des gravillons de 10 mm au plus. Remplir en deux couches, piquer chacune autour des barres et frapper les planches pour chasser l'air. Graver

Les barres reposent sur des cales : le béton passe dessous et les enrobe.

une flèche sur la face supérieure : posé à l'envers, le linteau aurait son acier du côté comprimé. Le garder humide sous une bâche pendant au moins 7 jours, davantage par temps frais.

Le mettre en place. Le linteau pèse environ 65 kg : le déplacer à deux au niveau du sol, ou avec une aide à la manutention au-dessus de la taille, et le poser sur un lit de mortier, côté acier en bas. Ne bâtir dessus qu'après environ 28 jours, quand le béton approche de sa résistance prévue.

Voir la traction à l'œuvre. Couler trois barrettes de mortier de 50 × 50 × 500 mm, une sans armature et deux avec un fil d'acier de 4 mm à 15 mm d'une face. Au bout d'une semaine, poser chacune sur deux briques espacées de 400 mm, au sol, placer une courte planche en travers de son milieu et y empiler des briques une à une. La barrette nue casse d'un coup ; celle dont le fil est en bas se fissure par-dessous, fléchit et porte bien davantage ; essayée fil en haut, la troisième casse presque comme la nue.

> **Sécurité.** Le ciment frais est très alcalin et brûle la peau contre laquelle il reste piégé : porter des gants étanches, des manches longues et des lunettes, et laver aussitôt les éclaboussures. Couper l'acier à la cisaille ou à la meuleuse uniquement avec lunettes et gants, loin de tout ce qui peut brûler. Étayer tout moule ; un coffrage qui retient du béton en hauteur relève des professionnels, car il peut s'effondrer sous le poids du béton. Pendant l'essai de charge, porter des lunettes, se tenir sur le côté et garder les pieds hors de portée de la charge.

Histoire et évolution

En 1848, Joseph-Louis Lambot fait flotter une barque de ciment sur treillis de fer sur l'étang de son domaine de Miraval, dans le Var. Il la fait breveter en 1855 et en expose une deuxième à Paris la même année ; la première est conservée au musée de Brignoles. Cette planche retient 1848, date de cette barque, l'un des premiers exemples conservés du fer et du ciment travaillant ensemble. En 1854, en Angleterre, William Boutland Wilkinson, de Newcastle, fait breveter des planchers armés de fer.

La barque de Lambot : une mince coque de ciment sur une grille de fer.

Joseph Monier, jardinier à Paris, dépose le 16 juillet 1867 un brevet pour des caisses et réservoirs en ciment armé, puis d'autres pour des ponts en 1873 et des poutres en 1878. En Allemagne, Gustav Adolf Wayss rachète ses brevets et construit plus de 300 ponts en arc entre 1887 et 1891. En 1892, François Hennebique fait breveter une ossature complète de poteaux, de poutres et de dalles, réalisée par des entrepreneurs agréés. Aux États-Unis, Ernest Ransome fait breveter une barre torsadée en 1884, et l'Ingalls Building de Cincinnati s'élève sur 16 niveaux en 1903.

Le pont de Salginatobel de Robert Maillart (1930) franchit une gorge suisse d'un arc creux de 90 m, épais de 20 cm seulement à la clé. Eugène Freyssinet fait breveter la précontrainte en 1928 et s'en sert en 1934 pour sauver la gare maritime du Havre, qui s'enfonçait dans l'argile.

Un rapport de Chatham House paru en 2018 estime la production mondiale de ciment à plus de 4 milliards de tonnes par an, en majeure partie pour le béton, et sa part des émissions mondiales de CO_2 à environ 8 %.

Chiffres clés

Le béton en traction

Environ 10 % de sa résistance à la compression

Eau des pores autour des barres

pH 12,5 à 13, qui protège l'acier de la rouille

Premiers jalons

La barque de Lambot, 1848 ; premier brevet de Monier, 16 juillet 1867

Dilatation thermique

Environ 10 millionièmes par °C pour le béton, 11 à 12 pour l'acier

Enrobage minimal (ACI 318)

Environ 38 mm sur les petites barres à l'extérieur, 75 mm contre le sol

Sources

1. Joseph Monier et l'invention du béton armé (B. Lemoine, 2023) · Association française de génie civil (AFGC) https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2026/03/JosephMONIER_InventionBeton.pdf
2. The Construction Industry enters the 20th Century (R. Day, 1980) · Bristol Industrial Archaeological Society Journal 13 https://b-i-a-s.org.uk/wp-content/uploads/2021/01/BIAS_Journal_13_FERRO_CONCRETE.pdf
3. The Invention of Reinforced Concrete (1848–1906) (Moussard, Garibaldi & Curbach, 2018) · TU Dresden, in High Tech Concrete (Springer) https://fis.tu-dresden.de/portal/en/publications/the-invention-of-reinforced-concrete-1848--1906(8f5281e9-99eb-4cdd-9eff-3687b595367f).html
4. Maison de Joseph Lambot à Montfort-sur-Argens · Office de tourisme Provence Verte & Verdon https://www.la-provence-verte.net/ot_campslasource/patrimoine-montfort-sur-argens-maison-de-joseph-lambot_1679.html
5. Musée des Comtes de Provence, Brignoles · Office de tourisme Provence Verte & Verdon https://www.la-provence-verte.net/activites/patrimoine-brignoles-musee-des-comtes-de-provence_435.html
6. Why is reinforced concrete used? · American Concrete Institute https://www.concrete.org/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=666
7. Concrete cover for members cast against earth (ACI 318-19) · American Concrete Institute https://www.concrete.org/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=903
8. Beam reinforcement detailing per ACI 318-19 (cover table) · ideCAD documentation https://help.idecad.com/ideCAD/beam-reinforcement-detailing
9. What stops the reinforcing steel in damp, porous concrete from corroding (usually)? (J. Broomfield) · Institute of Corrosion https://www.icorr.org/?p=22054
10. Thermal expansion and contraction of concrete · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/cracking/thermalexpansioncontraction/example.htm
11. Principles of reinforced concrete: objective of the steel-concrete combination (W. Pauchet, 2021) · Techniques de l'Ingénieur https://www.techniques-ingenieur.fr/en/resources/article/ti264/principles-of-reinforced-concrete-tba1024/objective-of-the-steel-concrete-combination-2
12. Properties of concrete · University of Memphis, Civil Engineering https://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html
13. Concrete slab reinforcement: lapping · RMIT University Learning Lab https://learninglab.rmit.edu.au/Toolbox/buildright/content/bcgbc4010a/10_floor_systems/03_concrete_slab_reinforcement/page_006.htm
14. Ingalls Building · American Society of Civil Engineers https://asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/ingalls-building
15. Alvord Lake Bridge · American Society of Civil Engineers https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/alvord-lake-bridge
16. Salginatobel Bridge · American Society of Civil Engineers https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/salginatobel-bridge
17. World Monument Salginatobel Bridge, technical profile · Schiers Tourism https://www.salginatobelbridge.com/s/English_Flyer.pdf
18. The Story of Eugène Freyssinet (K. Shushkewich, 2010) · ASPIRE, The Concrete Bridge Magazine https://www.aspirebridge.com/magazine/2010Fall/Perspective_Fall10.pdf
19. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete (Lehne & Preston, 2018) · Chatham House https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf
20. Cement · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cement.htm

Faits vérifiés le 2026-10-14

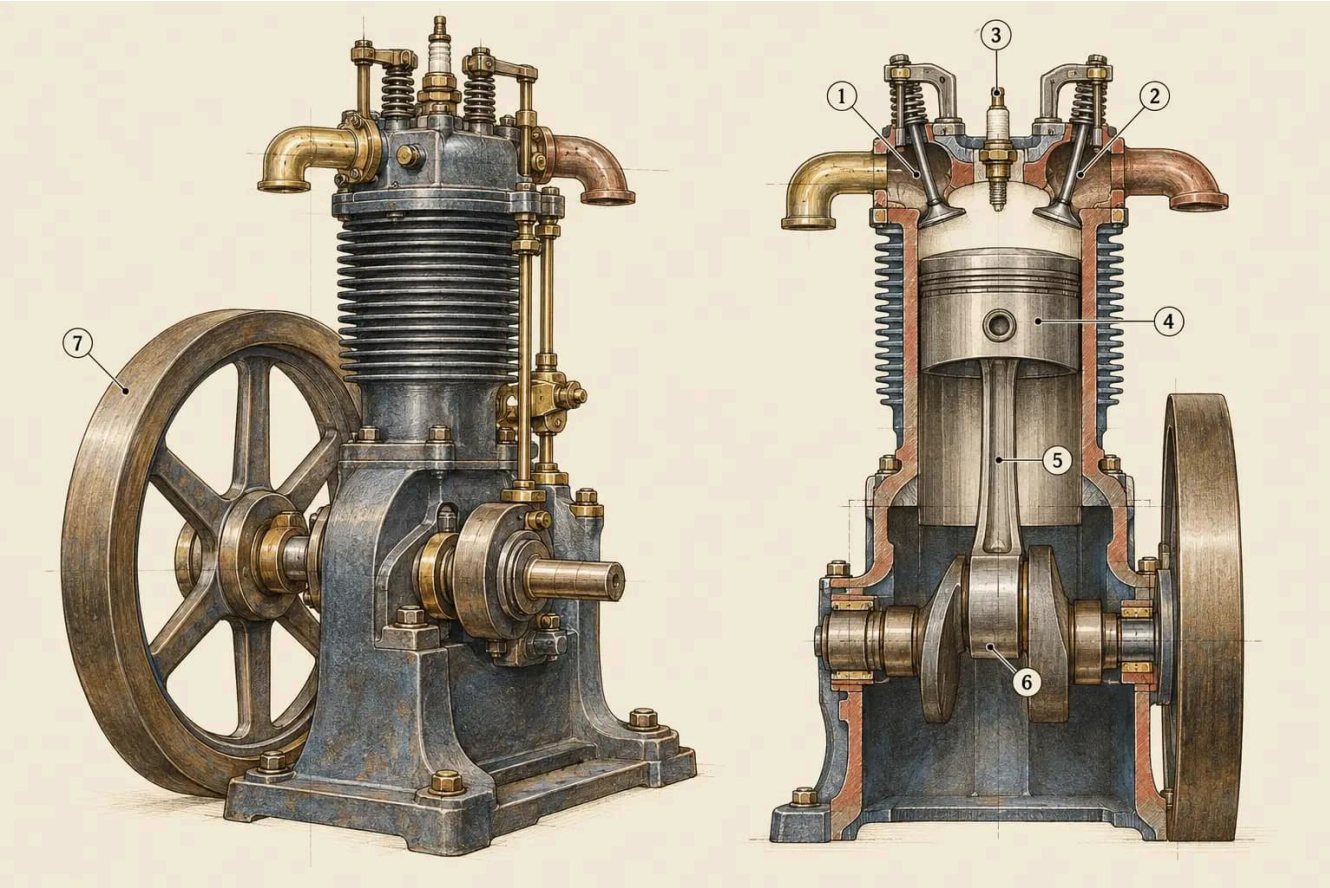
Moteur à combustion interne

De petites explosions, une puissance régulière

1876 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite: Machine à vapeur (p. 229), Métallurgie du fer (p. 138), Acier (p. 142), Distillation (p. 176)

Mène à: Avion (p. 355)



1 Soupape d'admission 2 Soupape d'échappement 3 Bougie d'allumage 4 Piston 5 Bielle 6 Vilebrequin 7 Volant d'inertie

Un moteur à combustion interne brûle son carburant dans un cylindre fermé; le gaz chaud pousse un piston qui fait tourner un vilebrequin. Le moteur à gaz à quatre temps de Nicolaus Otto, en 1876, a fixé le schéma qu'on retrouve encore dans la plupart des moteurs de voitures, de bateaux et de groupes électrogènes.

Ce que c'est

Un moteur à combustion interne produit sa chaleur à l'intérieur même de la machine. La machine à vapeur brûle son combustible sous une chaudière séparée et envoie la vapeur au cylindre. Ici, une petite charge d'air et de carburant brûle dans le cylindre, et le gaz produit pousse directement sur un piston.

Le moteur de la planche est un monocylindre vertical comme on en construisait dans les années 1880 et 1890: un cylindre en fonte muni d'ailettes de refroidissement, un piston qui coulisse dedans, un vilebrequin en dessous et un lourd volant qui entraîne l'arbre entre deux combustions. Les moteurs d'automobile actuels ont plusieurs

cylindres et des alliages plus légers, mais ils transforment toujours la poussée sur un piston en rotation au moyen d'une bielle et d'un vilebrequin.

Comment ça marche

Le piston est un bouchon ajusté qui monte et descend dans le cylindre. Une bielle le relie à un maneton du vilebrequin : le va-et-vient du piston devient une rotation, comme les genoux du cycliste font tourner le pédalier.

La plupart des moteurs suivent le cycle à quatre temps qu'Otto a rendu utilisable. Dans un moteur à allumage commandé comme celui de la planche, il se déroule ainsi. Premier temps : le piston descend, soupape d'admission ouverte, et aspire un mélange d'air et de carburant. Deuxième temps : les deux soupapes sont fermées, le piston remonte et comprime le mélange dans un petit volume en haut du cylindre. Près du point haut, une étincelle l'enflamme (sur les premiers moteurs, c'était une flamme ou un tube chauffé au rouge). Le gaz s'échauffe d'un coup et repousse le piston vers le bas : ce troisième temps est le seul qui fournit du travail. Au quatrième, la soupape d'échappement s'ouvre et le piston, en remontant, chasse les gaz brûlés.

Des segments élastiques logés dans des gorges assurent l'étanchéité entre le piston et la paroi du cylindre.

Le vilebrequin fait deux tours pour un seul temps moteur ; le volant emmagasine assez d'énergie pour franchir les trois autres. Un arbre à cames, entraîné à demi-vitesse, ouvre chaque soupape au bon moment.

C'est la compression qui donnait l'avantage au moteur d'Otto. Un mélange comprimé avant de brûler libère sa chaleur à plus haute pression, et une plus grande part de cette chaleur se transforme en travail. Rudolf Diesel est allé plus loin dans les années 1890 : il comprimait de l'air seul jusqu'à ce qu'il soit assez chaud pour enflammer le carburant qu'on y injecte, sans aucune étincelle.

Comment le construire

Un moteur relève de la mécanique de précision : il faut une fonderie, un tour et une aléseuse, des instruments de mesure au centième de millimètre et un carburant fiable. Ce qui suit décrit la fabrication historique des pièces ; ce n'est pas un plan de construction.

Couler le cylindre et le bâti. Les premiers constructeurs coulaient cylindre et socle en fonte grise, facile à usiner et résistante à l'usure, puis alésaient le cylindre parfaitement rond et droit. La chemise d'eau ou les ailettes faisaient partie de la même pièce.

Faire le piston et les segments. Le piston, en fonte puis en aluminium, était tourné un peu plus petit que l'alésage. Des segments fendus en fonte élastique, logés dans ses gorges, appuient contre la paroi pour empêcher le gaz de passer.

Forger le vilebrequin et la bielle. Ces pièces, les plus sollicitées, étaient forgées en acier, puis tournées et montées sur des coussinets en bronze ou en régule.

Caler la distribution et l'allumage. Les cames, puis la magnéto ou la bobine qui produit l'étincelle, doivent agir au bon moment du cycle. Un mauvais calage fait mal tourner le moteur ou provoque un retour de manivelle.

Alimenter et refroidir. Les moteurs d'Otto marchaient au gaz de ville. Les moteurs à essence ont demandé un carburateur pour doser le mélange d'air et de carburant. Tout moteur doit être refroidi, par eau ou par air, et

graissé pour que les pièces mobiles ne grippent pas.

> **Sécurité.** Le carburant et ses vapeurs s'enflamment facilement et peuvent exploser dans un espace clos. Les gaz d'échappement contiennent du monoxyde de carbone, mortel, sans odeur ni signe avant-coureur : ne faites jamais tourner un moteur à l'intérieur ni dans un espace partiellement clos, même portes et fenêtres ouvertes. Le volant, les courroies et la manivelle de démarrage peuvent briser des os, et un retour de manivelle peut provoquer des blessures graves. Les pièces chaudes et l'eau de refroidissement sous pression brûlent.

Histoire et évolution

Depuis deux siècles, on cherchait à pousser un piston par une explosion. Christiaan Huygens a fait des essais avec de la poudre à canon dans les années 1670, et en 1807 le Suisse François Isaac de Rivaz a breveté un moteur à hydrogène, qu'il a ensuite monté sur un petit chariot. Le premier moteur vendu en nombre est celui d'Étienne Lenoir, en 1860. Il ressemblait à une machine à vapeur à double effet, mais il brûlait le mélange sans le comprimer et gaspillait l'essentiel de son gaz.

Des moteurs à gaz fixes comme celui-ci entraînaient les machines des ateliers avant que les véhicules à moteur ne se répandent.

Nicolaus Otto, représentant de commerce à Cologne, fait construire en 1861 par un mécanicien de la ville, Michael Zons, un moteur sur le modèle de Lenoir afin de l'étudier. Avec l'ingénieur Eugen Langen, il construit un moteur « atmosphérique » qui remporte une médaille d'or à l'Exposition universelle de Paris en 1867 et sera fabriqué à plusieurs milliers d'exemplaires. En 1876, Otto met au point son moteur à quatre temps avec compression. Le Français Alphonse Beau de Rochas avait décrit le même cycle dans une brochure de 1862 ; pour cette raison, le brevet allemand d'Otto est annulé en 1886, et d'autres firmes peuvent alors reprendre le principe.

Gottlieb Daimler et Wilhelm Maybach, tous deux anciens de la société d'Otto, construisent en 1885 un petit moteur rapide qui tourne à plusieurs centaines de tours par minute. Le moteur devient assez léger pour un véhicule. La même année, Carl Benz achève son tricycle à moteur, dont il dépose le brevet en janvier 1886.

La voiture de Benz avait un monocylindre à quatre temps de moins d'un litre.

En 1897, à Augsbourg, le moteur de Diesel atteint un rendement de 26,2 % lors d'un essai, plus du double des machines à vapeur de l'époque. Au XXe siècle, les moteurs à combustion interne s'imposent dans les transports routiers, l'agriculture, la marine et les premiers avions. Les moteurs électriques les remplacent dans beaucoup de voitures, mais la plupart des moteurs thermiques construits aujourd'hui suivent encore la séquence à quatre temps qu'Otto a mise en œuvre en 1876.

Chiffres clés

Premier quatre-temps d'Otto

1876, environ 3 ch à 180 tr/min

Moteur d'essai de Diesel

Rendement de 26,2 %, 17 février 1897

Temps moteur (moteur à quatre temps)

Un par cylindre pour deux tours de vilebrequin

Sources

1. Replica Otto four-stroke engine · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8405692/replica-otto-four-stroke-engine-internal-combustion-engine
2. Nikolaus August Otto · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/history/nikolaus-august-otto
3. Early history of the diesel engine · DieselNet https://www.dieselnet.com/tech/diesel_history.php
4. Otto engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_engine

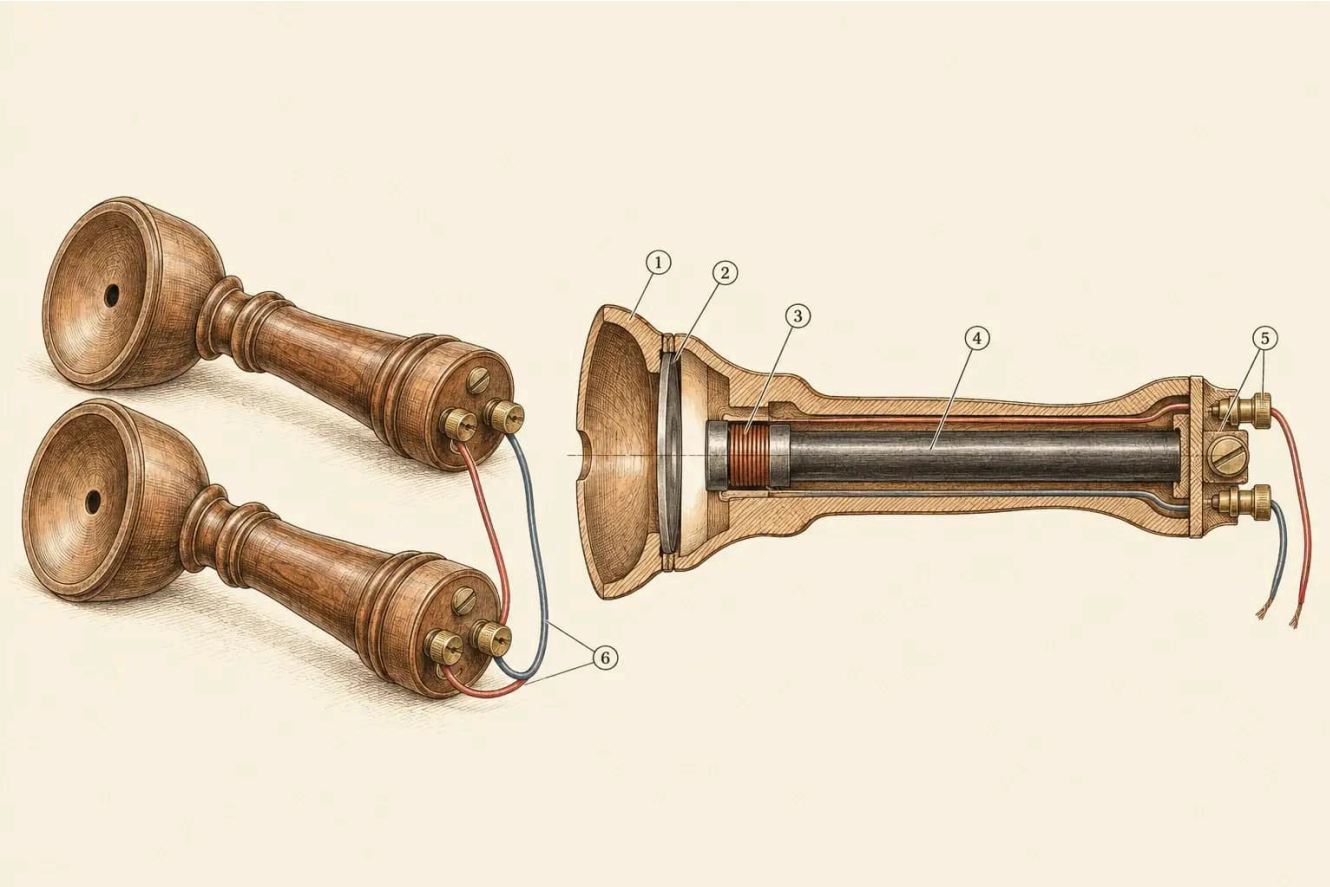
Faits vérifiés le 2026-10-11

Téléphone

Une voix portée par un fil

1876 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Télégraphe électrique (p. 288)



1 Embouchure et écouteur 2 Membrane de fer 3 Bobine 4 Aimant en barreau 5 Bornes 6 Fil de ligne

Le téléphone change les vibrations de la voix en un courant électrique variable, l'envoie le long d'un fil et le retransforme en son à l'autre bout. Alexander Graham Bell le fit breveter en mars 1876 ; deux ans plus tard, ses téléphones magnétiques étaient déjà utilisés commercialement, et le microphone à charbon puis les centraux en firent bientôt un service public.

Ce que c’est

Un téléphone transporte la voix elle-même le long d’une paire de fils. Un émetteur change les ondes de pression de la voix en un courant électrique dont l’intensité suit les variations de la pression sonore ; un récepteur, à l’autre bout, se sert de ce courant pour faire bouger une mince plaque et recréer le son.

La planche montre l’un des téléphones à main de Bell de 1877-1878, un instrument en bois tourné surnommé « butterstamp », parce qu’il rappelait un moule à beurre. Le même appareil servait à parler et à écouter, et il fonctionnait sans pile : c’est la voix elle-même qui produisait le courant.

Comment ça marche

Dans le boîtier de bois du butterstamp, un aimant en barreau d'acier occupe toute la longueur du manche. À son extrémité avant se trouve une courte pièce polaire en fer doux, entourée d'une bobine de fil de cuivre fin isolé. Juste devant ce pôle, séparé de lui par un intervalle d'une fraction de millimètre, un mince disque de fer, la membrane, est serré par son bord derrière l'embouchure. Les deux bouts de la bobine sortent sur des bornes à l'arrière, d'où une paire de fils part vers l'autre téléphone.

Le téléphone à ficelle transmet le son mécaniquement : la voix fait vibrer le fond d'une boîte, et la ficelle tendue fait vibrer l'autre.

Quand quelqu'un parle dans l'embouchure, la pression de l'air sur la membrane monte et descend, et le disque se creuse et se bombe très légèrement. Chaque fois qu'il se rapproche du pôle, une plus grande partie du champ de l'aimant traverse le fer ; chaque fois qu'il s'en éloigne, une plus petite. Un champ magnétique variable dans une bobine y fait naître une tension : la bobine envoie donc sur la ligne un faible courant alternatif qui suit la forme de l'onde sonore.

Dans le microphone à charbon, la membrane comprime une capsule de grains de charbon, si bien que le courant d'une pile varie avec la voix.

À l'autre bout, le même courant parcourt la bobine du second téléphone. Il renforce ou affaiblit l'attraction de l'aimant permanent sur la membrane de cet appareil, qui bouge donc au rythme de celle de l'orateur et fait vibrer l'air devant elle. Toute l'énergie vient de la voix : le son est faible et la portée courte. À partir de la fin des années 1870, les téléphones reçurent un microphone à charbon : la membrane appuie sur du charbon, dont la résistance électrique baisse quand on le comprime, si bien que la voix fait varier le courant d'une pile au lieu de le produire. Le signal devenait beaucoup plus fort.

Comment le construire

Deux petits haut-parleurs montrent le même principe, le passage réversible du son au mouvement et au courant. Ils sont construits autrement que l'appareil de Bell : dans un haut-parleur, la bobine est fixée à la membrane et se déplace avec elle dans le champ d'un aimant, alors que dans le butterstamp la bobine et l'aimant restent immobiles et seule la membrane de fer bouge. Reliés l'un à l'autre, deux haut-parleurs forment un téléphone sans pile.

Réunir le matériel. Il faut deux petits haut-parleurs identiques de 8 ohms et de 5 à 8 cm de diamètre, achetés seuls ou récupérés sur des jouets à piles dont on a retiré les piles (jamais sur des radios ou d'autres appareils fonctionnant sur le secteur, même débranchés : certaines pièces restent chargées), et quelques mètres de fil de sonnette double ou de câble de haut-parleur.

Câbler. Dénudez un centimètre à chaque bout du câble. Reliez un conducteur à la première borne de chaque haut-parleur et l'autre conducteur à la seconde borne de chacun, avec des bornes à vis ou en torsadant et en isolant les jonctions au ruban adhésif.

Parler. Commencez avec un câble court, puis tendez-le entre deux pièces, porte fermée, pour que votre partenaire ne vous entende pas directement. Parlez fort, tout près d'une membrane, pendant qu'il tient l'autre haut-parleur contre son oreille ; débranchez ensuite un fil et recommencez pour vérifier que le son passe bien par la ligne. Attendez-vous à une voix faible ; le résultat dépend des haut-parleurs : si rien ne passe, raccourcissez le câble ou essayez des haut-parleurs d'une autre taille. Échangez les rôles : chaque haut-parleur sert d'émetteur et de récepteur, comme le butterstamp.

Comparer. Faites aussi un téléphone à ficelle avec deux boîtes ou deux gobelets en carton et quelques mètres de ficelle nouée dans un trou au fond de chacun. Gardez la ficelle tendue et loin de tout obstacle, et comparez les deux.

> **Sécurité.** Ce circuit n'a pas besoin de pile et ne doit jamais être branché sur le secteur ni sur une ligne téléphonique, qui portent tous deux des tensions dangereuses. Les boîtes ouvertes ont des bords coupants : limez-les ou couvrez-les de ruban adhésif. Ne criez pas dans l'oreille de quelqu'un à travers l'un ou l'autre téléphone.

Histoire et évolution

Plusieurs inventeurs avaient cherché à transmettre la parole par l'électricité avant Bell. En 1861, Philipp Reis présenta à Francfort un appareil qu'il baptisa téléphone, mais qui resta une curiosité. Antonio Meucci déposa en 1871 un avis préalable de brevet pour un « télégraphe sonore », qu'il laissa expirer en 1874 ; son droit d'antériorité est encore discuté.

Bell, qui travaillait alors à Boston, déposa sa demande de brevet le 14 février 1876, le jour même où Elisha Gray déposait un avis préalable décrivant une idée voisine, et l'ordre d'arrivée des deux documents reste contesté. Le brevet n° 174 465 fut délivré le 7 mars. Trois jours plus tard, avec un émetteur à liquide, Bell adressa sa première phrase clairement intelligible à son assistant Thomas Watson. Il abandonna bientôt l'émetteur à liquide pour le téléphone magnétique, breveté le 30 janvier 1877. Le 12 février 1877, un public réuni à Salem entendit un orateur qui parlait depuis Boston, à quelque 26 km.

L'émetteur à liquide de Bell, mars 1876 : la voix fait vibrer la membrane, le fil plonge plus ou moins dans l'eau acidulée et le courant varie.

Thomas Edison mit au point un émetteur à charbon en 1877, et Henry Hunnings, en Angleterre, utilisa du charbon en grains. Le premier central commercial ouvrit à New Haven, dans le Connecticut, le 28 janvier 1878, avec 21 abonnés reliés à la main sur un standard. Les centraux automatiques d'Almon Strowger permirent ensuite aux abonnés d'établir eux-mêmes leurs communications, ce que le cadran numéroté facilita à partir de 1896. Dans les années 1950, les États-Unis comptaient plus de la moitié des téléphones du monde.

Chiffres clés

Brevet de Bell
N° 174 465, déposé le 14 février 1876, délivré le 7 mars 1876

Téléphone magnétique sans pile
Brevet américain n° 186 787, 30 janvier 1877

Première phrase intelligible de Bell
10 mars 1876, Boston : « Mr. Watson, come here, I want to see you » (carnet de Bell)

Premier central commercial
New Haven, 28 janvier 1878 : 21 abonnés à 1,50 dollar par mois

Sources

1. Telephone · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Telephone
2. Early telephone by Alexander Graham Bell, 1877 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co32960/early-telephone-by-alexander-graham-bell-1877
3. US186787A: Improvement in electric telegraphy (A. G. Bell, 1877) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US186787A/en
4. First Commercial Telephone Exchange – Today in History: January 28 · Connecticut Humanities https://connecticuthistory.org/the-first-commercial-telephone-exchange-today-in-history
5. Telephone · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Telephone
6. Replica of Bell's liquid transmitter of March 1876 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co33314/replica-of-bells-liquid-transmitter-of-march-1876-1880-1958-telephone
7. The Telephone: a lecture entitled Researches in Electric Telephony (A. G. Bell, Society of Telegraph Engineers, 1877) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/55787
8. Some experiments with the telephone (Lord Rayleigh, Scientific Papers) · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/books/abs/scientific-papers/some-experiments-with-the-telephone/3FE1242F3DA62548052EB38CDF24909D
9. Vibration of Plates (A. W. Leissa, NASA SP-160, 1969) · NASA https://ntrs.nasa.gov/citations/19700009156
10. Early receivers · Telephone Collecting https://telephonecollecting.org/Bobs%20phones/Pages/Essays/Early%20Receivers/Early%20Receivers.htm
11. Copper Wire Tables (NBS Handbook 100, 1966) · National Bureau of Standards https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/hb/nbshandbook100.pdf
12. US7760869B2: Method and apparatus for controlling the transmit volume level of a speakerphone (mouth reference point and TIA-810-B test level) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US7760869B2/en

Faits vérifiés le 2026-10-12

Ampoule à incandescence

Un filament brillant dans le vide

1879 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Générateur électrique (p. 276), Verre (p. 134)

1 Globe de verre 2 Filament de carbone 3 Fils d'entrée en platine 4 Pied de verre scellé 5 Queusot 6 Culot à vis

Une ampoule à incandescence produit de la lumière en chauffant à blanc un mince filament parcouru par un courant, dans un globe de verre vidé d'air pour que le filament ne brûle pas. Joseph Swan et Thomas Edison la rendirent utilisable en 1879, et elle éclaira maisons et rues pendant plus d'un siècle.

Ce que c'est

L'ampoule à incandescence est un globe de verre contenant un fil très fin, le filament, qui brille quand un courant le traverse. Avant elle, les maisons s'éclairaient à la flamme : bougies, lampes à huile, becs de gaz, qui fumaient et causaient souvent des incendies. Il existait des lampes électriques à arc, bien trop vives pour une pièce.

La lampe de la planche est du type fabriqué par l'usine d'Edison au début des années 1880. Ses descendantes furent la lampe domestique courante pendant l'essentiel du XXe siècle, avant que les lampes fluocompactes, puis les LED, prennent leur place.

Comment ça marche

Tout matériau assez chauffé émet de la lumière. La résistance électrique transforme l'énergie du courant en chaleur, et un filament fin passe du rouge sombre à l'orange, puis au blanc. Plus il chauffe, plus la lumière est blanche et efficace, mais plus le filament s'évapore vite.

À l'air libre, un fil de carbone ou de métal porté au blanc brûle en quelques instants : il faut donc vider le globe, ou plus tard le remplir d'un gaz inerte. La pompe se branche au sommet par un mince tube de verre, que l'on scelle ensuite à la flamme : c'est la petite pointe des anciennes lampes, le queusot.

Les fils qui amènent le courant au filament doivent traverser le verre. Or verre et métal se dilatent différemment, et un scellement mal assorti se fend à l'échauffement. Le platine se dilate presque comme le verre des premières ampoules, d'où de courts fils de platine traversant un pied de verre, raccordés à du cuivre, moins cher, dans le culot.

Edison conçut la lampe et le réseau ensemble. Un filament à haute résistance électrique consomme peu de courant sous une centaine de volts : les lampes se branchent alors en parallèle, chacune avec son interrupteur, sur des conducteurs de cuivre de section raisonnable.

Seuls 5 à 10 % environ de l'électricité ressortent en lumière visible ; le reste part en chaleur.

Dans la pompe de Sprengel, chaque goutte de mercure emprisonne un peu d'air et l'entraîne vers le bas du tube.

Comment la construire

Une lampe durable demande un verrier, une pompe à vide atteignant une très basse pression et un filament dimensionné pour sa tension d'alimentation. Seule la première étape se fait sans danger à la maison ; les autres décrivent la fabrication des premières lampes en atelier.

Voir le principe. Serrer un bout de mine de crayon fine entre deux pinces métalliques sur un carreau de céramique, sous un bocal de verre retourné. L'alimenter par une alimentation de laboratoire réglée vers 12 volts, limite de courant au minimum, puis monter lentement cette limite. La mine rougeoie, puis brûle et se rompt dans l'oxygène du bocal : d'où la nécessité du vide.

Carboniser le filament. Les ateliers noyaient des boucles de bambou ou de fil de coton dans du charbon de bois en poudre, dans un creuset à couvercle muni d'un évent, chauffé au rouge dans un four pendant des heures. Privée d'air, la fibre devient du carbone au lieu de cendre ; les gaz dégagés, inflammables, contiennent du monoxyde de carbone.

Sceller les fils. Deux courts fils de platine, ou d'un métal adapté au verre, étaient fondus dans un pied de verre ; le filament y était fixé à la pâte de carbone, et le pied soudé dans le col d'un globe soufflé muni d'un fin tube d'évacuation au sommet. Un filament basse tension doit être plus court et plus épais qu'un filament de 100 volts.

Pomper et chauffer. L'ampoule raccordée à la pompe, un courant modéré dans le filament chassait les gaz du carbone et du verre. Quand la pression cessait de baisser, on fermait le tube à la flamme.

Poser le culot. Un culot à vis en laiton était plâtré sur le col, un fil soudé à la douille filetée, l'autre au plot central.

> **Sécurité.** La tension du secteur peut tuer : ne faire d'essais qu'avec une alimentation de laboratoire à limitation de courant de moins de 24 volts, jamais sur une prise murale, et ne jamais brancher directement une batterie de voiture ou au lithium sur un filament. Filaments, verre et pinces chauffent assez pour brûler la peau et enflammer du papier : travailler sur un carreau, loin de tout ce qui brûle. Une ampoule vidée d'air peut imploser et projeter du verre : porter des lunettes et travailler derrière un écran transparent. Les vapeurs de mercure sont toxiques : ne pas construire ni utiliser de pompe à mercure chez soi. Ne jamais chauffer un récipient fermé : la carbonisation dégage un gaz inflammable et du monoxyde de carbone, et se fait dans un four ventilé en plein air, pas dans une maison.

Histoire et évolutions

Les fibres de bambou carbonisé duraient bien plus longtemps que le papier et le fil des premières lampes.

En 1802, Humphry Davy fit rougeoyer une lame de platine avec une grande pile, et en 1840 Warren de la Rue plaça une spirale de platine dans un tube vidé d'air. Le platine coûtait trop cher ; le carbone était bon marché, mais il brûlait dans l'air laissé par les pompes de l'époque.

En Angleterre, Joseph Swan travaillait sur des filaments de papier carbonisé depuis 1850 environ. Un essai de 1860, dans un globe mal vidé, échoua. Dès 1875, il utilisa la nouvelle pompe de Sprengel et, entre décembre 1878 et février 1879, présenta à Newcastle upon Tyne des lampes au carbone qui fonctionnaient. En décembre 1880, il équipa Cragside, la demeure de l'industriel William Armstrong.

À Menlo Park (New Jersey), le laboratoire de Thomas Edison choisit un filament de carbone à haute résistance. Le 22 octobre 1879, une lampe à fil de coton carbonisé brûla 13 h 30 ; l'équipe augmenta alors le courant, et environ une heure plus tard l'ampoule surchauffa et se fendit. Le soir du 31 décembre 1879, Edison illumina son laboratoire et la rue voisine pour des visiteurs, avec des filaments en fer à cheval de carton carbonisé. En 1880, il adopta le bambou, avec des durées de vie annoncées d'environ 1 200 heures ; en 1882, la centrale de Pearl Street alimenta les premières lampes du sud de Manhattan. Après un conflit de brevets en Grande-Bretagne, les sociétés de Swan et d'Edison fusionnèrent en 1883 pour former « Ediswan ».

Vers 1910, le fil de tungstène étiré remplaça le carbone et donna une lumière plus blanche, avec un meilleur rendement.

Vers 1910, William Coolidge, chez General Electric, trouva comment étirer le tungstène, métal cassant, en fil fin. À blanc, le tungstène s'évapore bien plus lentement que le carbone : les lampes purent chauffer davantage. Irving Langmuir remplit ensuite les ampoules d'un gaz inerte, de l'azote au début, qui freine encore l'évaporation, et enroula le filament en hélice. Dès 2009, l'Union européenne puis bien d'autres pays ont retiré progressivement les ampoules à incandescence ordinaires, remplacées par les lampes fluocompactes, puis les LED.

Chiffres clés

Premier long essai d'Edison

13 h 30, puis environ une heure de plus à puissance accrue (22 octobre 1879)

Démonstrations de Swan à Newcastle

Décembre 1878 à février 1879

Filament de bambou carbonisé

Durées de vie d'environ 1 200 heures annoncées (à partir de 1880)

Part de l'énergie changée en lumière

Environ 5 à 10 %; le reste part en chaleur

Sources

1. Edison's Incandescent Lamp · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Edison%27s_Incandescent_Lamp
2. Lighting: From Research to Development · Thomas A. Edison Papers, Rutgers University https://edison.rutgers.edu/life-of-edison/biographical-essays/lighting/from-research-to-development
3. Lighting: The Carbon-Filament Lamp · Thomas A. Edison Papers, Rutgers University https://edison.rutgers.edu/life-of-edison/biographical-essays/lighting/the-carbon-filament-lamp
4. Joseph Swan · The Institution of Engineering and Technology (IET) Archives https://www.theiet.org/membership/library-archives/the-iet-archives/biographies/joseph-swan/
5. Joseph Swan · Newcastle University, Northern Innovation https://research.ncl.ac.uk/northerninnovation/exhibits/josephswan/
6. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station

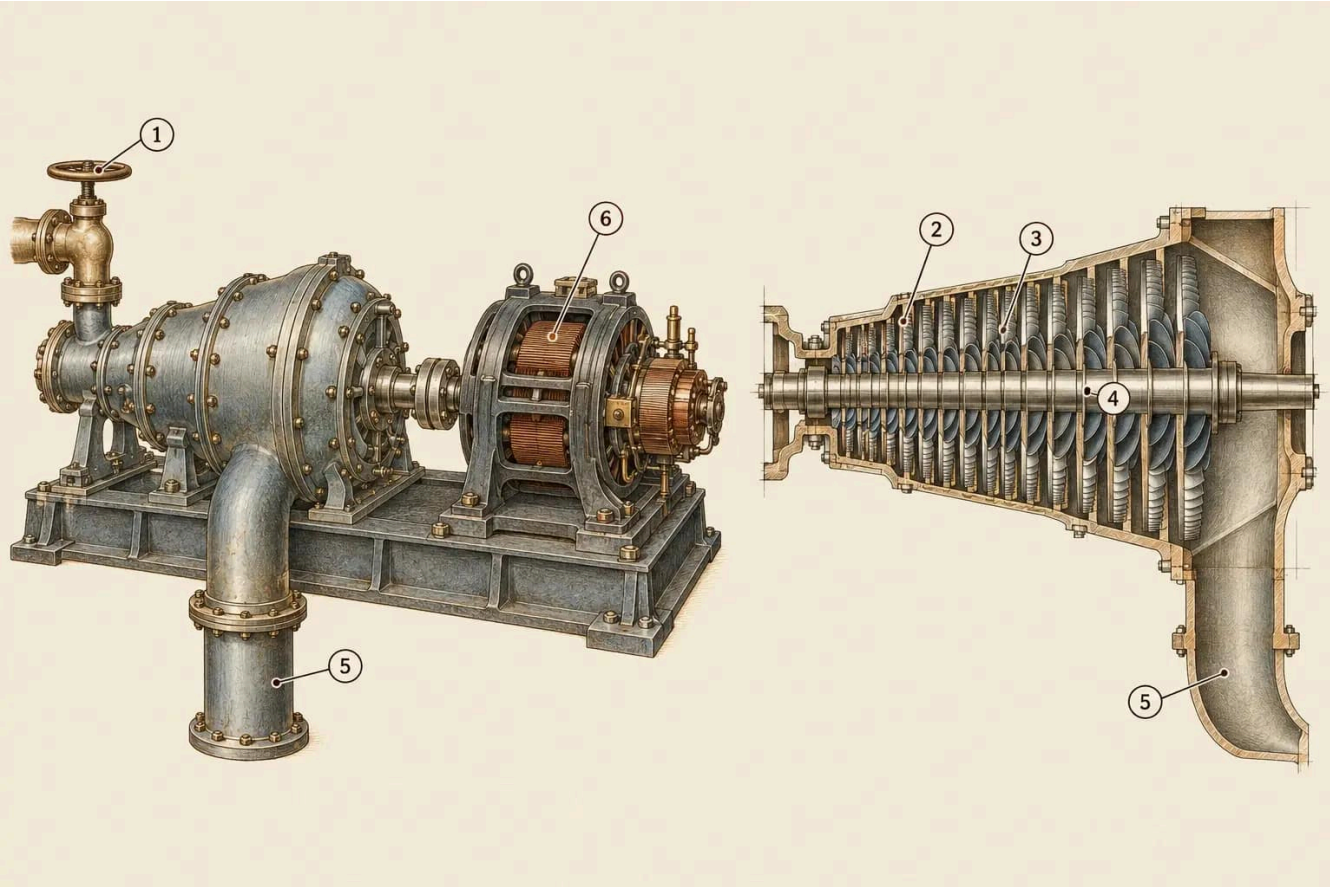
Faits vérifiés le 2026-10-11

Turbine à vapeur

La vapeur qui fait tourner les alternateurs

1884 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite: Machine à vapeur (p. 229), Acier (p. 142), Générateur électrique (p. 276)



1 Arrivée de vapeur et vanne d'arrêt 2 Aubes fixes du carter 3 Aubes mobiles du rotor 4 Arbre du rotor
5 Échappement vers le condenseur 6 Dynamo

Dans une turbine à vapeur, la vapeur se détend à travers des rangées d'aubes fixes et mobiles: sa pression devient vitesse, et cette vitesse fait tourner un arbre. Charles Parsons en a accouplé une à une dynamo en 1884; ses descendantes entraînent aujourd'hui les alternateurs qui produisent la plus grande partie de l'électricité mondiale.

Ce que c'est

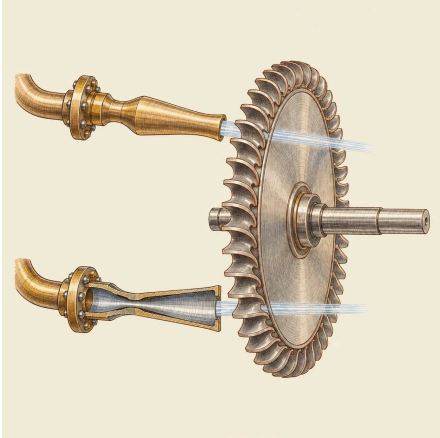
Une turbine à vapeur est une roue mue par la vapeur, sans piston ni bielle. La vapeur traverse des rangées d'aubes disposées autour d'un arbre et quitte la machine à une pression bien plus basse; l'énergie qu'elle cède en chemin fait tourner l'arbre. Le mouvement est régulier et rapide, ce qui convient à un générateur électrique.

Les centrales au charbon et nucléaires font bouillir de l'eau pour les entraîner. Les centrales au gaz à cycle combiné produisent de la vapeur avec l'échappement brûlant d'une turbine à gaz, et les centrales solaires thermiques comme la plupart des centrales géothermiques font de même avec la chaleur du soleil ou du sous-sol. Toutes ensemble, elles font de la turbine à vapeur la source de la plus grande partie de l'électricité mondiale.

Comment ça marche

La vapeur cède son énergie en se détendant. Dans une tuyère, un passage qui se rétrécit, sa pression baisse et elle accélère. Au point le plus étroit, le col, elle peut atteindre la vitesse du son ; pour aller plus vite, il lui faut un passage qui s'élargit après le col : c'est la forme évasée des tuyères de Laval. À chaque étage, une couronne d'aubes fixes sur le carter sert de série de tuyères et projette la vapeur sur une couronne d'aubes mobiles, courbes, portées par le rotor : elles dévient le jet, et cette déviation les pousse.

Dans un étage à action, presque toute la chute de pression a lieu dans les tuyères fixes, et les aubes mobiles ne font que recevoir le jet. Dans un étage à réaction, celui que Parsons a choisi, les canaux entre les aubes mobiles se rétrécissent aussi : la vapeur continue de se détendre en les traversant et les repousse en sortant. Dans un étage Parsons, la détente se partage à peu près à égalité entre la couronne fixe et la couronne mobile.



La roue à action de Laval : des tuyères évasées envoient leurs jets à travers une seule couronne d'aubes.

Libérée d'un coup dans une seule tuyère, une forte chute de pression donne un jet de plus de 1 000 mètres par seconde. Or les aubes travaillent le mieux à environ la moitié de la vitesse du jet : une roue unique doit alors tourner dangereusement vite et passer par un réducteur. Parsons a découpé la chute en nombreuses petites marches, si bien que l'arbre tourne à une vitesse utilisable par une dynamo.

À mesure que la pression baisse, la vapeur occupe plus de place : les aubes s'allongent vers l'échappement, jusqu'à 1,9 mètre au dernier étage des turbines construites pour Hinkley Point C, en Angleterre.

La vapeur rejetée à l'air libre cesse de se détendre à la pression atmosphérique. Un condenseur, une enceinte de tubes refroidis par l'eau d'une rivière, de la mer ou d'une tour aéroréfrigérante, liquéfie la vapeur d'échappement et maintient un vide presque complet à la sortie de la turbine : la vapeur peut ainsi se détendre et travailler davantage dans la turbine avant d'être condensée. Les premières turbines à condensation de Parsons, à Cambridge en 1892, valaient les meilleures machines à piston de leur puissance.

Cette boucle s'appelle le cycle de Rankine : une pompe refoule l'eau dans la chaudière, qui la vaporise ; la vapeur se détend dans la turbine, puis le condenseur la ramène à l'état d'eau pour la pompe. Comprimer un liquide coûte peu à côté de ce que rend la vapeur, d'où un travail net. La pompe descend de la pompe à piston, la chaudière et le condenseur de la machine à vapeur ; un réfrigérateur fait tourner une boucle voisine en sens inverse.

Sur un réseau à 50 hertz, un alternateur bipolaire monté sur l'arbre tourne à 3 000 tours par minute, à 3 600 sur un réseau à 60 hertz. Des transformateurs élèvent ensuite la tension pour les lignes.

Comment s'y prendre

Une turbine de centrale est alimentée par une chaudière, c'est-à-dire un appareil sous pression : n'en fabriquez pas. Ce modèle marche à l'air. Il faut un moule à tarte jetable en aluminium, deux bouchons de liège, une aiguille à tricoter, des pailles, une boîte en carton, de la colle, et un sèche-cheveux réglé sur l'air froid ou une pompe à vélo.

Découper une roue à aubes. Tracer un disque de 10 cm. Faire 12 à 16 entailles depuis le bord en s'arrêtant à 2 cm du centre, puis tordre toutes les pales dans le même sens d'environ 30 degrés.

La monter. Coller la roue sur un bouchon enfilé sur l'aiguille, qui tourne dans deux bouts de paille fixés en travers de la boîte.

Comparer un tuyau et une tuyère. Avec la même pompe, à la même distance et sous le même angle, souffler sur les pales par un tube large, puis par une paille raccourcie tenue en biais, et noter lequel fait tourner la roue le plus vite.

Ajouter un étage. Coller une seconde roue, pales tordues dans le même sens, sur un second bouchon enfilé sur la même aiguille, 3 cm derrière la première. Entre les deux, fixer à la boîte un anneau de carton aux pales tordues dans l'autre sens, percé au centre d'un trou assez large pour ne toucher ni l'aiguille ni les roues. Souffler dans l'axe de l'aiguille à travers la roue avant, puis retirer l'anneau et comparer : les pales fixes devraient renvoyer sur la seconde roue l'air sortant de la première.

Mesurer la tension. Relier à l'aiguille, par un bout de tube, un petit moteur à courant continu de modélisme et brancher à ses bornes un multimètre réglé en volts continus. Si la roue parvient à entraîner le moteur, la tension monte avec la vitesse.

N'essayez pas ce modèle à la vapeur. En bouillant, l'eau donne plus de mille fois son volume de vapeur, et un récipient chauffé fermé ou obstrué monte en pression jusqu'à éclater. Les vraies chaudières suivent des plans certifiés, portent des soupapes de sûreté et sont inspectées régulièrement par une personne compétente ; une chaudière bricolée n'offre aucune de ces garanties.

> **Sécurité.** La vapeur brûle en une fraction de seconde, même au bec d'une bouilloire, où elle est invisible : garder mains et visages à l'écart. Ne jamais fermer, boucher ni obstruer un récipient chauffé. Une roue d'aluminium lancée a des bords coupants et peut projeter une pale : porter des lunettes et attacher les cheveux. N'utiliser qu'un petit moteur de modélisme et un multimètre, jamais le secteur, et tenir le sèche-cheveux loin de l'eau.

Histoire et évolutions

L'éolipyle de Héron : deux jets de vapeur font tourner la sphère sur ses pivots.

Au Ier siècle de notre ère, Héron d'Alexandrie décrit l'éolipyle, une boule creuse que font tourner des jets de vapeur sortant de tuyaux coudés : c'est le premier appareil connu à transformer la vapeur en rotation. En 1629, Giovanni Branca publie le dessin d'une machine où un jet de vapeur souffle sur une roue à palettes ; elle n'a sans doute jamais été construite. En Suède, Gustaf de Laval brevette en 1883 une petite roue à réaction pour ses écrémeuses, puis en 1889 une turbine à action à un seul étage, munie d'un réducteur.

En 1884, Charles Parsons, associé de la maison Clarke, Chapman à Gateshead, accouple directement à une dynamo une turbine à nombreux étages à réaction. Elle fournit 7,5 kilowatts à 18 000 tours par minute, et quelque 200 groupes semblables éclairent des navires en 1888. En 1890, la centrale de Forth Banks, à Newcastle, est la première à employer des turbines.

Pour montrer ce que la turbine vaut sur un navire, Parsons construit Turbinia, une vedette de 31 mètres qui atteint 34,5 nœuds. Le 26 juin 1897, il la fait passer sans invitation devant les lignes de navires de guerre de la revue navale de Spithead. En 1905, un comité de l'Amirauté recommande les turbines pour toutes les classes de navires de guerre.

Aux États-Unis, Charles Curtis cède ses droits à General Electric en 1896. Son groupe de 5 000 kilowatts de 1903, alors le plus puissant du monde, mesure 7,6 mètres de haut, contre 18 pour une machine à piston de puissance

voisine. Les groupes atteignent 660 mégawatts à Drax dans les années 1970, et chacune des deux turbines construites pour Hinkley Point C est prévue pour 1 770 mégawatts.

Turbinia à pleine vitesse : trois turbines sur trois arbres entraînaient neuf hélices.

Chiffres clés

Premier turbo-dynamo de Parsons

1884 : 7,5 kW à 18 000 tr/min

Turbinia

34,5 nœuds ; présentée à Spithead le 26 juin 1897

Part de l'électricité des États-Unis, 2022

Environ 53 % : 42,5 % des centrales à vapeur, 10,7 % de la partie vapeur des cycles combinés

Premières turbines à condensation

Cambridge, 1892 : trois groupes de 100 kW à 4 800 tr/min

Vitesse d'une turbine de réseau

3 000 tr/min sur un réseau à 50 Hz, 3 600 à 60 Hz ; moitié moins pour les grands groupes nucléaires

Sources

1. Parsons' steam turbine generator, 1884 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co51109
2. Charles Algernon Parsons 1854–1931 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/ap26725/parsons-charles-algernon
3. 100 K.W. Parsons' Radial Flow Steam Turbine alternator with Generator, partly sectioned · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8625819/100-k-w-parsons-radial-flow-steam-turbine-alternator-with-generator-partly-sectioned
4. Forward thinkers: Sir Charles Parsons, inventor of the steam turbine · Institution of Mechanical Engineers https://www.imeche.org/news/news-article/forward-thinkers-sir-charles-parsons-inventor-of-the-steam-turbine
5. Turbinia (1894) · Tyne Built Ships https://www.tynebuiltships.co.uk/T-Ships/turbinia1894.html
6. Curtis 5000-kW Vertical Turbine (ASME Landmark) · Engineering and Technology History Wiki, ASME https://ethw.org/ASME-Landmark:Curtis_5000-kW_Vertical_Turbine
7. Charles Gordon Curtis · ASME https://www.asme.org/topics-resources/content/charles-gordon-curtis
8. Carl Gustaf Patrik De Laval · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Carl_Gustaf_Patrik_De_Laval
9. C. A. Parsons and Co: Electricity Generation and Transmission · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/C._A._Parsons_and_Co:_Electricity_Generation_and_Transmission
10. Heron of Alexandria · MacTutor, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Heron/
11. Giovanni Branca · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/literature-and-writing/giovanni-branca
12. Fluid Machinery, Lecture 24: steam turbines · NPTEL, Indian Institutes of Technology https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104117/chapter_6/6_9.html
13. Nozzle Design · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/nozzle-design/
14. The Rankine cycle · MIT, Unified Engineering thermodynamics notes https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node65.html
15. How electricity is generated · U.S. Energy Information Administration https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/how-electricity-is-generated.php
16. Arabelle goes to new lengths · Nuclear Engineering International https://www.neimagazine.com/analysis/arabelle-goes-to-new-lengths/
17. Introduction to pressure equipment · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pressure-systems/about.htm
18. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97) · International Association for the Properties of Water and Steam https://www.iapws.org/relif/IF97-Rev.html
19. TRANSFORM.Fluid.Machines.SteamTurbine: Stodola ellipse law and Baumann wetness correction (after D. H. Cooke, J. Eng. Gas Turbines Power 107, 1985) · OpenModelica, Oak Ridge National Laboratory TRANSFORM library https://build.openmodelica.org/Documentation/TRANSFORM.Fluid.Machines.SteamTurbine.html

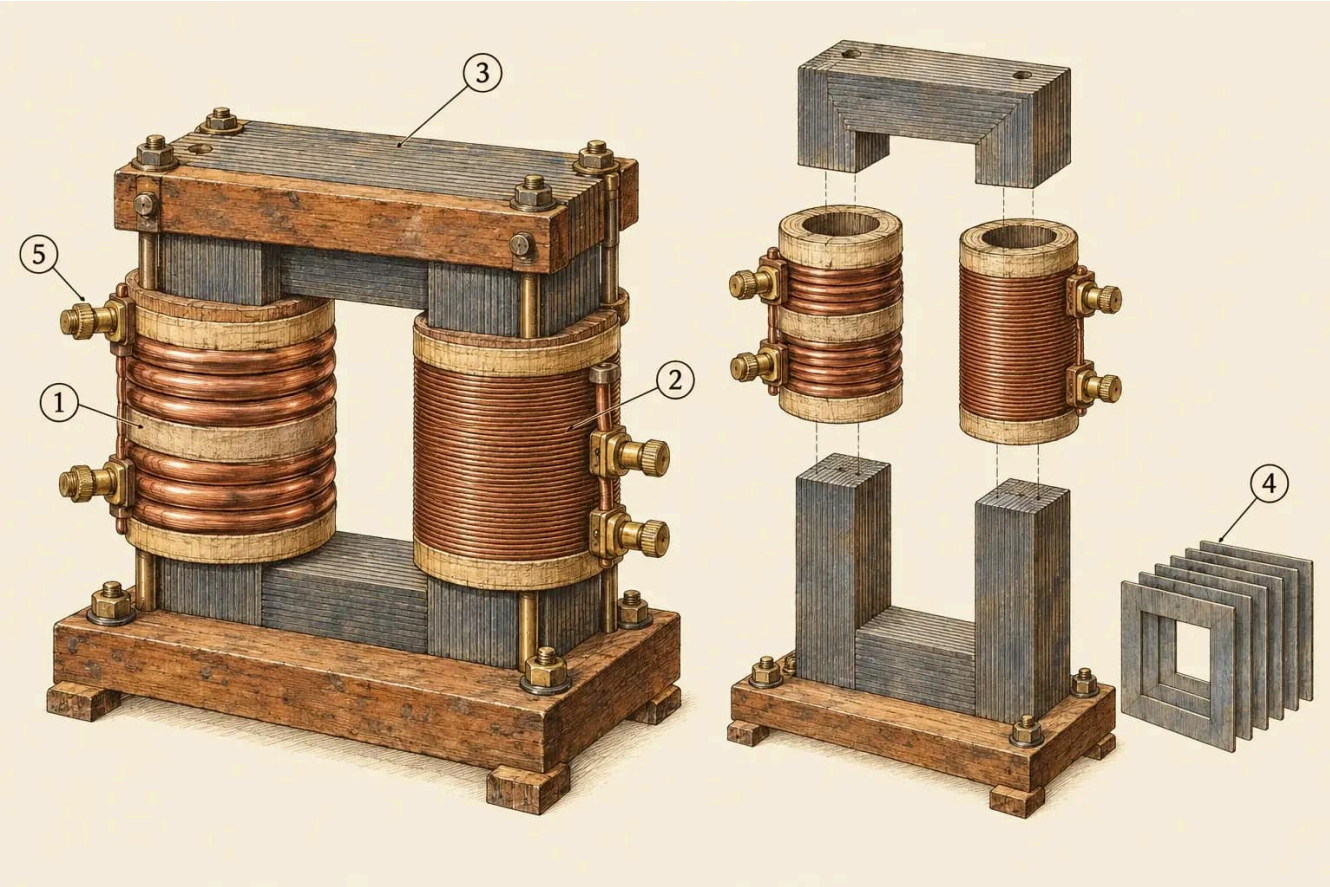
Faits vérifiés le 2026-10-14

Transformateur

Élever et abaisser la tension

1885 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Générateur électrique (p. 276), Métallurgie du fer (p. 138)



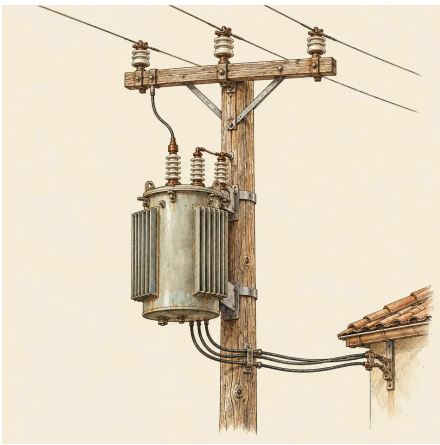
1 Primaire : peu de spires de gros fil 2 Secondaire : beaucoup de spires de fil fin 3 Noyau de fer feuilleté 4 Tôles minces du noyau 5 Borne de raccordement

Un transformateur, ce sont deux bobines de fil sur un même noyau de fer : un courant alternatif dans la première fait naître dans la seconde une tension plus haute ou plus basse, selon le rapport de leurs nombres de spires. Il permet d'envoyer l'électricité à haute tension sur de longues lignes et de la livrer à la tension qu'utilisent les appareils, et c'est la raison principale pour laquelle le courant alternatif s'est imposé dans les réseaux du monde.

Ce que c’est

Un transformateur change la tension d’un courant alternatif. Il ne comporte aucune pièce mobile : deux bobines de fil de cuivre isolé, le primaire et le secondaire, enroulées sur un noyau de fer fermé. L’énergie entre par une bobine et ressort par l’autre sous une tension plus haute ou plus basse, le courant variant en sens inverse.

Les centrales élèvent la tension pour les grandes lignes. Les postes l’abaissent par étapes, et un dernier transformateur, sur un poteau ou dans une petite cabine, la ramène aux 230 ou 120 volts d’une prise. Les chargeurs et les sonnettes en contiennent de petits.



Un transformateur sur poteau abaisse la tension de la ligne de la rue jusqu'à celle de la maison.

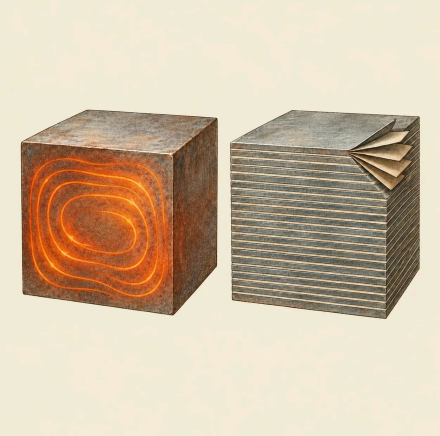
Comment ça marche

Le courant du primaire aimante le noyau de fer. Comme ce courant est alternatif, l'aimantation croît, retombe et s'inverse, au rythme de cinquante ou soixante cycles complets par seconde. Ce flux variable traverse le secondaire et fait naître une tension dans chacune de ses spires : c'est l'induction découverte par Faraday, qui n'agit que tant que le flux change.

Chaque spire des deux bobines voit le même flux, si bien que les tensions des deux bobines sont dans le rapport de leurs nombres de spires. Avec 1 000 spires au primaire et 50 au secondaire, 4 600 volts à l'entrée donnent 230 volts à la sortie. Dans un transformateur idéal, sans pertes, le côté basse tension porte un courant vingt fois plus fort, d'où un fil plus gros.

En courant continu, rien de tout cela ne fonctionne : un flux constant ne fait naître aucune tension, et le primaire n'est plus qu'un bout de fil branché sur la source, qui chauffe. Les transformateurs exigent du courant alternatif, et c'est pourquoi l'alternatif est devenu la règle des réseaux ; les liaisons actuelles en courant continu à haute tension convertissent l'alternatif en continu au départ et le continu en alternatif à l'arrivée.

La haute tension est rentable parce que la chaleur perdue dans un fil croît comme le carré du courant. Envoyons 100 kilowatts dans une ligne dont les fils font 2 ohms en tout. Sous 1 000 volts, le courant vaut 100 ampères et les fils dissipent 20 kilowatts, le cinquième de la puissance. Sous 10 000 volts, le courant tombe à 10 ampères et la perte à 200 watts, soit 0,2 %.



Un noyau massif chauffe sous l'effet des courants qui y tournent ; des tôles minces isolées entre elles les réduisent fortement.

Le flux fait aussi circuler des courants en boucle dans le fer lui-même, les courants de Foucault, et un noyau massif chaufferait comme une plaque de cuisinière. Le noyau est donc un empilement de tôles de quelques dixièmes de millimètre, isolées l'une de l'autre par un vernis ou une couche d'oxyde. Ces pertes diminuent comme le carré de l'épaisseur des tôles. Les premiers constructeurs employaient pour la même raison des faisceaux de fils de fer ; les noyaux modernes sont en acier au silicium.

Les réseaux utilisent le triphasé : trois courants alternatifs décalés d'un tiers de période, portés par trois fils et transformés par trois jeux de bobines sur un même noyau.

Comment le construire

Il s'agit d'une démonstration sur table, à quelques volts, jamais d'un montage sur le secteur. Il faut un boulon d'acier d'une dizaine de centimètres, un second boulon nu et deux plats d'acier, 20 à 30 m de fil de cuivre émaillé de 0,3 à 0,5 mm, du ruban isolant, du papier de verre fin, un multimètre qui mesure les tensions alternatives et, pour le dernier essai, un galvanomètre à zéro central.

Bobiner. Sur une couche de ruban, enrouler sur le boulon un primaire de 100 spires. Le recouvrir de ruban, bobiner par-dessus un secondaire de 100 spires, remettre du ruban et ajouter au-dessus un secondaire de 50 spires. Poncer l'émail au bout de chaque fil.

Choisir une source sûre. Prendre un adaptateur secteur du commerce dont l'étiquette indique une sortie alternative (« AC ») de 12 volts au plus, ou un générateur de fonctions donnant un signal sinusoïdal de quelques volts vers 1 kHz, sans composante continue. La plupart des adaptateurs sortent du continu et ne conviennent pas. Une ampoule de voiture à incandescence de 12 volts et 5 watts environ, en série avec le primaire, limite le courant.

Mesurer. Relever la tension alternative aux bornes du primaire, puis de chaque secondaire, puis débrancher : le boulon massif chauffe. Avec l'adaptateur, on lit quelques dixièmes de volt, car l'essentiel de la tension tombe dans l'ampoule. La bobine de 50 spires donne environ la moitié de la tension de celle de 100, et les deux restent sous la tension du primaire, parce que le flux d'un boulon seul se referme dans l'air. Poser le boulon nu à côté du boulon bobiné et relier leurs têtes, puis leurs pointes, par les plats d'acier, pour que le fer forme un cadre fermé autour des bobines : les mesures montent.

Essayer une pile. Avec une pile de 4,5 volts à la place de l'adaptateur, ampoule toujours en série, brancher sur le secondaire un galvanomètre à zéro central, sur son calibre le moins sensible ou à travers une résistance de quelques kilohms. L'aiguille dévie d'un côté quand on ferme le circuit, de l'autre quand on l'ouvre, et reste à zéro entre les deux.

Lire une plaque signalétique. Sur un transformateur de sonnette, repérer les tensions d'entrée et de sortie, par exemple 230 V / 12 V, et la puissance en voltampères (VA). Les gros appareils indiquent aussi la fréquence, le mode de refroidissement et l'impédance ; ceux-là se lisent depuis l'extérieur de la clôture.

> **Sécurité.** Ne jamais donner à un secondaire plus de spires qu'au primaire, et se rappeler qu'un adaptateur à vide peut fournir un cinquième de plus que ce qu'indique son étiquette. Ouvrir un circuit qui traverse une bobine produit une brève pointe de tension : couper avec un interrupteur ou un fil tenu par son isolant, jamais avec les doigts sur les bouts dénudés. Ne jamais bobiner pour le secteur, ni ouvrir, modifier ou recâbler un appareil fonctionnant sur le secteur, même débranché : les transformateurs de four à micro-ondes et d'enseigne au néon délivrent des courants mortels. Un transformateur abaisseur alimenté à l'envers élève la tension, et les condensateurs d'un appareil peuvent rester chargés après débranchement. Les bobines restent chaudes après usage. Ne jamais grimper à un poteau, entrer dans un poste ni toucher une ligne tombée. Les installations sur le secteur relèvent d'un électricien qualifié.

Histoire et évolutions

Michael Faraday montre l'induction en août 1831 avec son anneau de fer à deux bobines, Joseph Henry la découvre de son côté en Amérique, et vers 1850 Heinrich Ruhmkorff, à Paris, fait de la bobine d'induction un instrument courant des laboratoires.

En 1884, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs éclairent des lampes le long d'une ligne de 40 km entre Turin et Lanzo avec leurs « générateurs secondaires », montés en série sur des noyaux de fer ouverts : allumer une lampe dérègle les autres.

Aux usines Ganz de Budapest, Károly Zipernowsky, Miksa Déri et Ottó Bláthy comprennent qu'un noyau de fer fermé et des transformateurs branchés en parallèle tiendront la tension stable. Ils déposent leurs brevets entre janvier et mars 1885, baptisent l'appareil « transformateur » et éclairent avec leur système l'Exposition nationale de Budapest en mai.

Un des premiers transformateurs de Budapest : le fil de fer enveloppe l'anneau de cuivre et ferme le circuit magnétique.

George Westinghouse achète les droits de Gaulard et Gibbs, et son ingénieur William Stanley construit des transformateurs à noyau fermé qui éclairent la grand-rue de Great Barrington, dans le Massachusetts, en mars 1886. Le courant continu d'Edison, sous 110 volts environ, ne dessert que quelques rues autour de chaque centrale, et ses sociétés font campagne sur les dangers de l'alternatif. Westinghouse éclaire en alternatif l'Exposition de Chicago en 1893, et en 1896 le courant des chutes du Niagara atteint Buffalo.

Dès 1888, Galileo Ferraris et Nikola Tesla ont obtenu un champ tournant pour les moteurs avec des courants décalés ; en 1891, une ligne triphasée transporte 300 chevaux sur 175 km, de Lauffen à Francfort. Les grandes lignes actuelles fonctionnent à des centaines de milliers de volts.

Chiffres clés

Principe découvert
29 août 1831, anneau de fer de Faraday à la Royal Institution

Première distribution en alternatif par transformateurs aux États-Unis
Great Barrington (Massachusetts), mars 1886 (William Stanley)

Pertes en ligne
À puissance et ligne égales : dix fois plus de tension, cent fois moins de pertes

Transformateur à circuit magnétique fermé
Demandes de brevet déposées de janvier à mars 1885 par Zipernowsky, Déri et Bláthy, des usines Ganz de Budapest

Ligne Lauffen–Francfort, 1891
175 km sous 15 000 volts, en triphasé, plus de 75 % de l'énergie livrée

Sources

1. Michael Faraday's ring-coil apparatus · The Royal Institution https://rigb.org/node/143
2. History of the Transformer (F. Uppenborn, 1889) · Project Gutenberg https://gutenberg.org/files/56365/56365-h/56365-h.htm
3. Centenary of the transformer (P. Asztalos, 1986) · Periodica Polytechnica Electrical Engineering, Budapest University of Technology and Economics https://pp.bme.hu/ee/article/view/4637
4. Gaulard and Gibbs secondary generator · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/GaulardGibbsSecondaryGenerator.html
5. Milestones: Alternating Current Electrification, 1886 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Alternating_Current_Electrification,_1886
6. Milestones: Long Distance Electric Power Transmission Using Three-Phase Alternating Current, 1891 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Long_Distance_Electric_Power_Transmission_Using_Three-Phase_Alternating_Current,_1891
7. Milestones: Rotating Fields and Early Induction Motors, 1885-1888 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Rotating_Fields_and_Early_Induction_Motors,_1885-1888
8. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station,_1882
9. History of Transformers · Edison Tech Center https://edisontechcenter.org/Transformers.html
10. The War of the Currents: AC vs. DC Power · U.S. Department of Energy https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power
11. Eddy currents · schoolphysics https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Electricity%20and%20magnetism/Electromagnetic%20induction/text/Eddy_currents/index.html
12. Transformer · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/magnetic/transf.html
13. Introduction to Electric Power Systems (J. L. Kirtley), 3.4 Transformers · LibreTexts https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electro-Optics/Introduction_to_Electric_Power_Systems_(Kirtley)/03%3A_Polyphase_Networks/3.04%3A_Transformers
14. Commission Regulation (EU) No 548/2014, Annex I: ecodesign requirements for transformers · legislation.gov.uk https://www.legislation.gov.uk/eur/2014/548/annex/I/division/1/adopted

Faits vérifiés le 2026-10-14

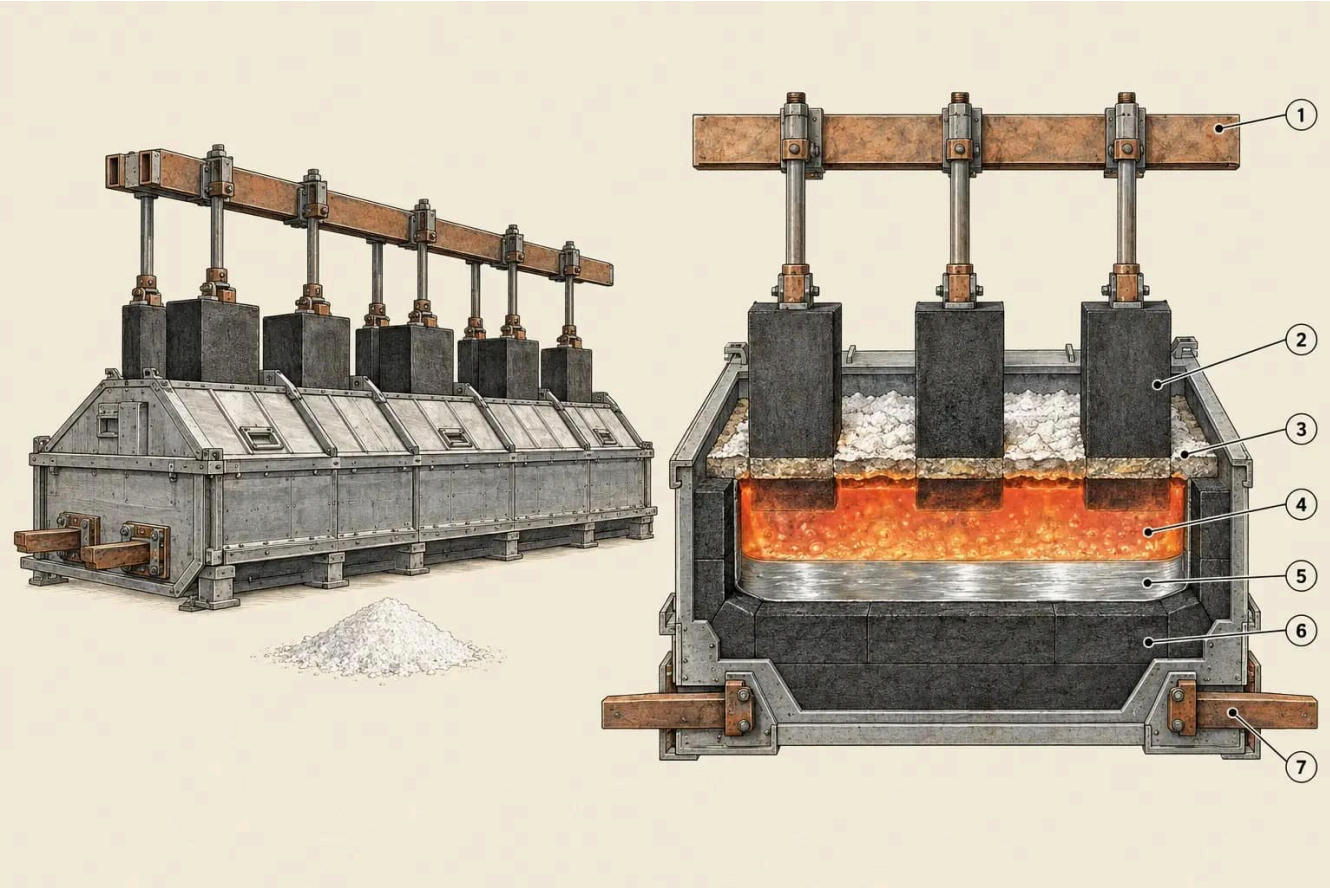
Aluminium

L'alumine changée en métal par le courant

1886 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Générateur électrique (p. 276), Turbine hydraulique (p. 267)

Mène à : Avion (p. 355)



1 Barre omnibus et tiges d'anode 2 Anodes en carbone 3 Croûte de bain figé et d'alumine 4 Bain de cryolithe fondue chargé d'alumine 5 Aluminium liquide 6 Garnissage cathodique en carbone 7 Caisson d'acier et barres collectrices

L'aluminium est le métal le plus répandu de l'écorce terrestre, mais il y est pris dans des oxydes que ni le feu ni le charbon de bois ne savent défaire. Depuis 1886, on l'obtient en raffinant la bauxite en alumine, en dissolvant cette alumine dans de la cryolithe fondue et en la décomposant par un fort courant continu.

Ce que c'est

L'aluminium est un métal léger et argenté, environ trois fois moins dense que l'acier. Il forme à peu près 8 % de la masse de l'écorce terrestre, plus que tout autre métal, et pourtant on ne le trouve presque jamais à l'état natif. Il est lié à l'oxygène dans les argiles, les feldspaths et la plupart des roches courantes, et ce lien résiste au feu de charbon de bois qui libère le fer ou le cuivre.

Son minerai est la bauxite, une roche rougeâtre née de l'altération des sols tropicaux. Une raffinerie la transforme en alumine, une poudre d'oxyde blanche, puis une usine d'électrolyse décompose cette alumine par le courant

dans la cuve Hall-Héroult de la planche. C’est toujours la seule voie industrielle pour produire de l’aluminium neuf.

Comment ça marche

Du minerai au métal : deux à trois tonnes de bauxite donnent une tonne d’alumine, et deux tonnes d’alumine une tonne d’aluminium.

De la bauxite à l’alumine. Dans le procédé Bayer, la bauxite broyée est attaquée sous pression par de la soude caustique chaude, entre 140 et 280 °C selon le minerai. Les minéraux d’aluminium se dissolvent ; les oxydes de fer et le sable se déposent en un résidu rouge. Refroidie et ensemencée de cristaux d’une opération précédente, la liqueur laisse croître de l’hydroxyde d’aluminium, que l’on calcine jusqu’à 1 100 °C environ pour obtenir l’alumine.

De l’alumine au métal. L’alumine fond au-delà de 2 000 °C, mais un bain de cryolithe fondue, un fluorure de sodium et d’aluminium, additionné de fluorure d’aluminium, la dissout vers 950 à 980 °C. La cuve est un caisson d’acier garni de blocs de carbone, qui forment l’électrode négative. Des anodes en carbone plongent dans le bain, suspendues par des tiges à une lourde barre omnibus.

Le courant continu passe des anodes au garnissage à travers le bain et décompose l’alumine dissoute. L’aluminium, plus dense que le bain, se rassemble au fond à l’état liquide. L’oxygène rejoint les anodes et brûle leur carbone en dioxyde de carbone, à raison de 0,4 à 0,5 kg de carbone par kilogramme de métal : on remplace donc les anodes usées à tour de rôle. Une croûte de bain figé et d’alumine garde la chaleur. On ajoute l’alumine à travers elle et on aspire le métal à intervalles réguliers.

Le courant maintient aussi le bain en fusion. Les cuves sont montées en série, chacune traversée par bien plus de cent mille ampères sous quatre à cinq volts. Chaque atome d’aluminium demande trois électrons : la cuve consomme environ 13 à 15 kilowattheures par kilogramme, dont moins de la moitié sert à la réaction elle-même. L’électricité est le premier poste de coût, si bien que les usines s’installent là où elle est bon marché, près des barrages du Canada, de la Norvège ou de l’Islande ou de grandes centrales, avec des transformateurs et des redresseurs pour fournir le courant continu.

À l’air, une pellicule d’oxyde de quelques nanomètres se forme aussitôt sur le métal ; elle arrête la corrosion et se reforme quand on la raye. Quelques pour cent de cuivre, de magnésium, de silicium ou de zinc le rendent assez résistant pour l’aviation. Le recyclage n’a qu’à refondre : 8,3 gigajoules par tonne contre 186 pour le métal neuf en 2019, soit environ 95 % d’économie.

Comment s’y prendre

Ne fabriquez pas et ne fondez pas d’aluminium chez vous. Le bain dégage des fumées fluorées toxiques et tourne vers 1 000 °C, et une goutte d’eau piégée sous le métal liquide se vaporise d’un coup et projette le métal ; des canettes fondues ajoutent les fumées des peintures et des vernis. Un atelier peut trier le métal, le travailler à froid et montrer l’électrolyse sous quelques volts.

Trier. Un aimant attire l’acier, pas l’aluminium. Pour le distinguer d’autres métaux non magnétiques, pesez un morceau et mesurez l’eau qu’il déplace : l’aluminium donne environ 2,7 grammes par centimètre cube, le cuivre et le laiton plus de 8. Rincez les restes alimentaires et mettez à part les pièces peintes ou plastifiées.

Plier et percer. Les nuances douces se plient à froid dans un étau, entre deux cales de bois dur ; les alliages durs se fissurent sur un pli vif, il faut les cintrer autour d’une forme arrondie. Pour percer, pointez le trou, serrez la tôle

L'aimant s'accroche à la boîte en acier et ignore la canette d'aluminium.

sur une planche et prenez un foret bien affûté avec une goutte d'huile : une tôle tenue à la main peut accrocher et tourner.

Assembler à froid. L'aluminium se soude mal : son oxyde fond au-delà de 2 000 °C, le métal à 660 °C, et il ne rougit pas avant de s'affaisser. Utilisez des rivets, des boulons ou une colle structurale, avec si possible des fixations en aluminium. À l'humidité, et surtout en bord de mer, l'aluminium se corrode au contact du cuivre, de l'acier et même de l'inox : séparez-les par des rondelles plastiques ou de la peinture.

Montrer le principe. Placez deux mines de crayon dans un verre d'eau additionnée d'une cuillère à café de cristaux de soude, et reliez-les à une pile de 9 volts. L'hydrogène se dégage à la mine négative, l'oxygène à la positive : le courant décompose l'eau comme la cuve décompose l'alumine.

> **Sécurité.** Ni métal fondu ni électrolyse de sels fondus hors d'une usine. Une tôle coupée blesse : portez des gants pour la manipuler et ébavurez chaque coupe, mais retirez-les avant de percer, et protégez vos yeux. Les cristaux de soude irritent la peau et les yeux, portez des lunettes. N'utilisez jamais de sel de cuisine dans la démonstration, car il dégage du chlore ; tenez l'hydrogène loin des flammes et n'employez qu'une petite pile, jamais le secteur.

Histoire et évolutions

Hans Christian Ørsted obtient en 1825 un minuscule échantillon impur à partir du chlorure d'aluminium. Friedrich Wöhler prépare une poudre en 1827, puis de petites billes en 1845.

En France, Henri Sainte-Claire Deville réduit le chlorure par le sodium et présente un lingot à l'Exposition universelle de Paris en 1855. Napoléon III le soutient et aurait réservé des couverts en aluminium à ses hôtes de marque. En décembre 1884, une pyramide d'aluminium de 100 onces coiffe le Washington Monument, à 1,10 dollar l'once, à peu près le prix de l'argent.

Couverts d'aluminium du Second Empire, quand le métal valait autant que l'argent.

En 1886, deux hommes de 22 ans trouvent la même solution. Le 23 février, à Oberlin, dans l'Ohio, Charles Martin Hall, avec des piles de fabrication maison, obtient des globules d'aluminium à partir d'alumine dissoute dans la cryolithe. Paul Héroult, qui a consacré son héritage à une dynamo, dépose un brevet français le 23 avril. La société de Hall à Pittsburgh, future Alcoa, produit dès 1888 ; le procédé d'Héroult démarre à Neuhausen, près des chutes du Rhin. Karl Josef Bayer dépose en 1887 la précipitation de l'alumine par ensemencement, puis en 1892 l'attaque de la bauxite sous pression ; ensemble, elles rendent l'alumine pure bon marché.

La livre coûte environ 4,86 dollars en 1888 et moins d'un dollar au début des années 1890. Le moteur des frères Wright, en 1903, a un carter en aluminium ; des alliages durcis par traitement thermique comme le duralumin, vendus à partir de 1909 environ, gagnent les dirigeables puis les avions. Les usines d'électrolyse ont produit environ 74 millions de tonnes de métal neuf en 2025.

Chiffres clés

Température de la cuve
Environ 950 à 980 °C

Du minerai au métal
2 à 3 t de bauxite par tonne d'alumine ; environ 2 t d'alumine par tonne de métal

Production primaire
Environ 74 millions de tonnes en 2025 (estimation USGS), dont 45 millions en Chine

Électricité
Environ 13 à 15 kWh par kilogramme d'aluminium

Recyclage
Environ 5 % de l'énergie du métal neuf (8,3 contre 186 GJ par tonne, en 2019)

Sources

1. Aluminum: Common Metal, Uncommon Past · Science History Institute, Distillations https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/aluminum-common-metal-uncommon-past/
2. The Washington Monument's aluminum capstone · National Park Service https://www.nps.gov/articles/000/wamocap.htm
3. Production process: Refining · International Aluminium Institute https://alustory.international-aluminium.org/?p=374
4. Production process: Reduction · International Aluminium Institute https://alustory.international-aluminium.org/?p=1905
5. Aluminium recycling saves 95% of the energy needed for primary aluminium production · International Aluminium Institute https://international-aluminium.org/landing/aluminium-recycling-saves-95-of-the-energy-needed-for-primary-aluminium-production/
6. Alumina refining · Australian Aluminium Council https://aluminium.org.au/?p=227
7. Aluminium smelting · Australian Aluminium Council https://aluminium.org.au/how-aluminium-is-made/aluminium-smelting-chart/
8. Ionic liquids as electrolytes in aluminum electrolysis (Wu et al., 2022) · Frontiers in Chemistry https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.1014893/full
9. Aluminum (Mineral Commodity Summaries 2026) · U.S. Geological Survey https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-aluminum.pdf
10. Aluminum (Al) · U.S. Geological Survey https://pubs.usgs.gov/sir/2017/5118/elements/Aluminum/Al_txt.html
11. Aluminium : historique · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/aluminium/2-historique/
12. Hall, Charles · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/news-wires-white-papers-and-books/hall-charles
13. K. J. Bayer, Process of obtaining alumina, US 382,505 (filed 1887) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US382505A/en
14. K. J. Bayer, Process of making alumina, US 515,895 (filed 1892) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US515895A/en
15. Aluminium · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium

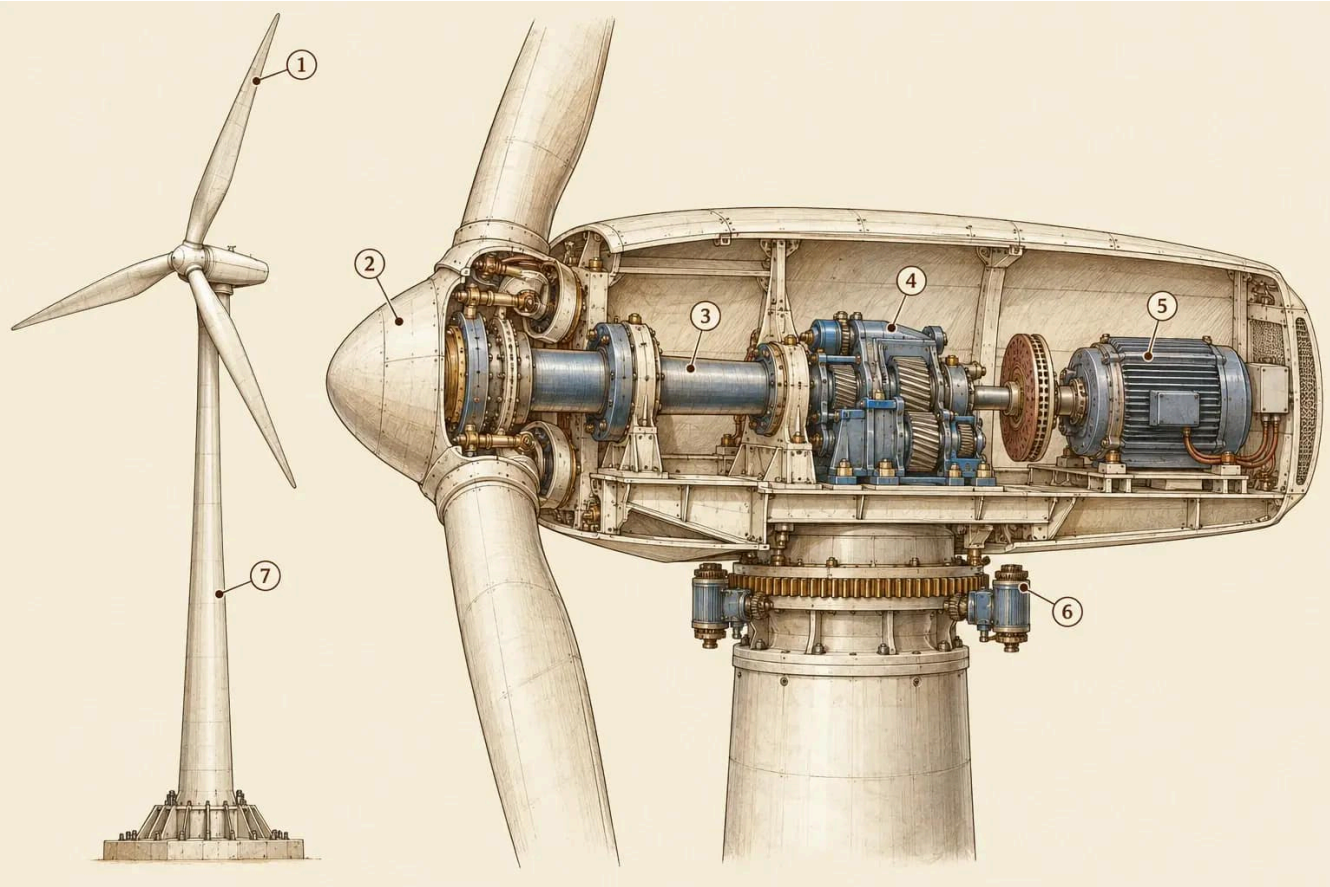
Faits vérifiés le 2026-10-14

Éolienne

Le vent changé en électricité

1887 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite: Moulin à vent (p. 188), Générateur électrique (p. 276), Accumulateur au plomb (p. 306), Acier (p. 142)



1 Pale 2 Moyeu et roulements de calage 3 Arbre principal (lent) 4 Multiplicateur 5 Génératrice 6 Couronne et moteurs d'orientation 7 Mât

Une éolienne est un rotor à longues pales profilées comme des ailes, que le vent fait tourner et qui entraîne une génératrice électrique en haut d'un mât. Les petites chargent des batteries; les grandes, dont le rotor dépasse cent mètres de diamètre, alimentent le réseau à travers un transformateur.

Ce que c'est

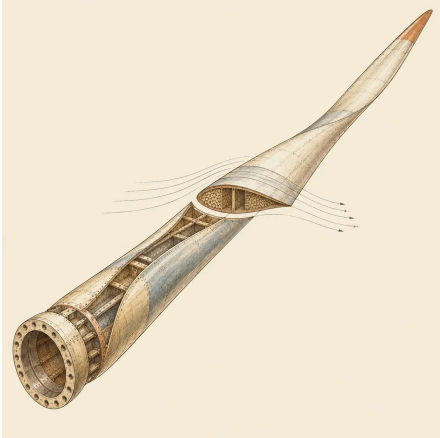
Une éolienne est un moulin à vent conçu pour produire de l'électricité: le rotor fait tourner un arbre, et l'arbre entraîne une génératrice. La machine dessinée ici reprend la disposition de presque toutes les grandes éoliennes actuelles. Trois pales effilées (1) font face au vent devant un mât d'acier (7), et la nacelle, au sommet, abrite la chaîne de transmission et pivote pour suivre le vent.

Comment ça marche

La puissance du vent vaut $P = ½·ρ·A·v^3$: ρ est la masse volumique de l'air, environ 1,2 kg/m^3, A la surface balayée par le rotor et v la vitesse du vent. Un rotor de 3 mètres de diamètre balaie environ 7,1 m^2. À 6 m/s, le vent qui le

traverse porte ½ × 1,2 × 7,1 × 6^3 ≈ 920 watts ; à 12 m/s, huit fois plus, soit environ 7,4 kW. C'est pourquoi les éoliennes sont perchées sur de hauts mâts, là où le vent souffle plus fort.

Un rotor ne peut pas prendre toute cette puissance. Il tire son énergie en freinant l'air, mais l'air ralenti doit encore s'écouler derrière lui, sinon l'air neuf ne pourrait plus passer. Vers 1920, le physicien allemand Albert Betz a montré que la part maximale est de 16/27, soit 59,3 %. Les éoliennes réelles en captent en général 35 à 45 % sur leur plage de marche ; un grand rotor moderne approche 48 % à son meilleur point de fonctionnement, et le multiplicateur et la génératrice en perdent encore un peu.



La section d'une pale est une aile. Elle se vrille sur sa longueur, car le bout va bien plus vite que la racine.

Les pales modernes sont des profils aérodynamiques et travaillent par portance, comme une aile d'avion. Lancée à grande vitesse en travers du vent, une pale reçoit un air qui vient surtout de côté, et la portance sur son profil la tire en avant. La vitesse spécifique, c'est-à-dire la vitesse du bout de pale divisée par celle du vent, vaut environ 7 sur les éoliennes tripales raccordées au réseau : par vent de 10 m/s, les bouts de pale filent à environ 70 m/s.

Dans le moyeu (2), chaque pale tourne dans un grand roulement, ce qui permet de la faire pivoter sur son propre axe. Ce réglage du calage permet au rotor de capter le plus possible sous la vitesse de vent nominale et de limiter la puissance au-delà. L'éolienne démarre à la vitesse de démarrage, vers 3 à 5 m/s, et atteint sa pleine puissance à sa vitesse nominale. Au-delà de la vitesse de coupure, environ 25 à 29 m/s, elle met ses pales en drapeau, le rotor ralentit et un frein le bloque. Une girouette sur la nacelle indique la direction du vent, et des moteurs d'orientation (6) font pivoter la nacelle sur une couronne dentée, comme le faisait l'éolienne d'orientation sur un moulin.

Sur les grandes machines, l'arbre principal (3) tourne à environ 8 à 20 tours par minute. Dans une chaîne classique, un multiplicateur (4) l'accélère une centaine de fois pour la génératrice (5), qui tourne à plus de mille tours par minute. D'autres modèles emploient une génératrice à vitesse moyenne avec moins d'engrenages, ou se passent de multiplicateur avec une grosse génératrice lente à nombreux pôles magnétiques. Une électronique de puissance cale la production sur la fréquence du réseau, et un transformateur élévateur relève la tension.

Comment la construire

Une petite éolienne peut recharger une batterie au plomb de 12 volts. Construisez-la d'après un plan publié et éprouvé qui précise les pales, le mât et la protection contre l'emballement ; les étapes ci-dessous montrent ce qu'un tel plan doit couvrir. Renseignez-vous d'abord sur les règles d'urbanisme et parlez-en aux voisins.

Choisir le site. Près du sol, le vent est faible et turbulent. Une règle courante place le bas du rotor au moins 9 mètres au-dessus de tout obstacle situé à moins de 90 mètres. Un anémomètre à la hauteur prévue donne une première idée en quelques semaines ; une année entière montre les saisons.

Choisir la génératrice. Un moteur à courant continu à aimants permanents, par exemple de tapis de course, fait une bonne génératrice. Entraînez-le avec une perceuse à des vitesses connues, une charge de 12 volts branchée, et mesurez tension et courant : il doit fournir un courant utile au-dessus de 14 volts environ à quelques centaines de tours par minute, une vitesse que le rotor peut atteindre.

Faire le rotor. Les plans de petites machines découpent souvent les pales dans un tuyau en plastique ou les taillent dans un bois léger à fil droit. Respectez la qualité de tuyau, l'épaisseur de paroi et la forme de pale du plan : les pales en tuyau se fatiguent et peuvent se fissurer au pied. Serrez le pied de chaque pale entre deux plaques

Des pales taillées dans un tuyau en plastique, un moteur de tapis de course et un safran en tôle.

métalliques sur le moyeu, équilibrez le rotor jusqu'à ce qu'il reste immobile dans n'importe quelle position, et remplacez une pale à la première fissure. Un rotor de 1,1 mètre de diamètre reçoit environ 70 watts de vent à 5 m/s ; 10 à 20 watts à la batterie est une estimation grossière, que seule une mesure confirmera.

Mât et safran. Un safran plat au bout d'une perche garde le rotor face au vent. Montez le moteur sur un pivot en haut d'un tube d'acier à pied articulé, et ancrez les haubans à une distance du pied comprise entre la moitié et les trois quarts de la hauteur du mât, pour pouvoir le basculer jusqu'au sol. Prenez le mât du plan, des ancrages dimensionnés pour la charge et un treuil à main pour le lever.

Empêcher l'emballement. Dans une rafale, ou privé de charge électrique, un rotor peut tourner jusqu'à se rompre. Une éolienne en plein air a besoin d'une protection automatique : beaucoup de petites éoliennes ont un safran articulé qui s'efface et tourne le rotor hors du vent fort ; d'autres comptent sur le décrochage ou sur des pales à calage variable. Sans cette protection, une éolienne ne doit pas tourner en plein air ; et même avec elle, arrêtez et couchez une petite éolienne avant une tempête.

Le câblage. Reliez la génératrice à la batterie par un fusible et une diode anti-retour, qui empêche la batterie de faire tourner le moteur. Un régulateur de délestage, dimensionné pour le courant de la génératrice et câblé selon son propre schéma, surveille la tension de la batterie et envoie la puissance dans une charge de délestage quand elle est pleine : des résistances prévues pour toute la puissance sous la tension de la batterie, car un radiateur secteur n'absorbe presque rien sous 12 volts. Un interrupteur qui court-circuite la génératrice ralentit le rotor par vent faible mais ne le bloque pas ; attachez une pale au mât avant de toucher au rotor.

Pour une version de table, placez un petit moteur muni de pales en carton devant un ventilateur et mesurez la tension à chaque vitesse.

> **Sécurité.** Les bouts de pale vont bien plus vite qu'il n'y paraît : ne vous tenez jamais dans le plan du rotor. Ne grimpez jamais à un mât tant que l'éolienne peut tourner ; arrêtez-la et basculez le mât. Éloignez tout le monde à une distance supérieure à la hauteur du mât quand on le lève ou l'abaisse, et tenez le mât et sa zone de chute bien à l'écart des lignes électriques aériennes. Les batteries au plomb contiennent de l'acide sulfurique et dégagent de l'hydrogène explosif pendant la charge : rangez-les dans un coffre ventilé, loin des étincelles et des pièces à vivre. Un court-circuit aux bornes d'une batterie peut faire fondre les fils et déclencher un incendie. Ne raccordez jamais vous-même une éolienne à l'installation d'un bâtiment ou au réseau : il faut un onduleur homologué et un électricien qualifié.

Histoire et évolutions

En juillet 1887, James Blyth, professeur à Glasgow, dresse un moulin à quatre ailes de toile près de sa maison de vacances de Marykirk, en Écosse. Sa dynamo charge des accumulateurs qui éclairent la maison. Une dynamo mue par le vent avait été présentée à Vienne en 1883, mais celle de Blyth est la première bien documentée qui ait servi au quotidien.

Pendant l'hiver 1887-1888, Charles F. Brush construit à Cleveland, dans l'Ohio, une dynamo éolienne à 144 pales de cèdre sur une tour de 18 mètres. Elle charge 12 batteries. Sa dynamo est le plus souvent donnée pour 12 kW, même si un article de presse ultérieur parle de 1,2 kW. À partir de 1891, Poul la Cour teste des éoliennes à Askov, au Danemark ; plus tard, il forme aussi des électriciens ruraux pour en construire.

Les fermes américaines achètent des éoliennes de charge en grand nombre ; les frères Jacobs en fabriquent à eux seuls environ 20 000, avant de fermer en 1956, quand le réseau a atteint les campagnes. Le 19 octobre 1941, l'éolienne bipale Smith-Putnam, dans le Vermont, d'une puissance de 1,25 MW, est raccordée au réseau ; elle perd une pale en 1945. En 1957, Johannes Juul construit à Gedser, au Danemark, une éolienne de 200 kW à trois pales, régulée par décrochage, avec une génératrice asynchrone. Ce « modèle danois » inspire les éoliennes construites à partir de la fin des années 1970.

En 2025, un prototype de 26 MW au rotor de 310 mètres est monté pour essais en Chine. Cette année-là, le vent a produit 8,5 % de l'électricité mondiale.

La machine de Brush à Cleveland : 144 pales de cèdre sur un rotor de 17 mètres.

Chiffres clés

Premier courant éolien d'usage régulier
James Blyth, Marykirk (Écosse), juillet 1887

Limite de Betz
Au plus 59,3 % (16/27) de la puissance du vent ; les grands rotors culminent vers 48 %

Part de l'électricité mondiale
8,5 % en 2025

Puissance du vent
$P = ½·ρ·A·v^3$: un vent deux fois plus rapide porte huit fois plus de puissance

Plage de marche
Démarre vers 3 à 5 m/s ; s'arrête au-delà de 25 à 29 m/s environ

Sources

1. July 1887: James Blyth harnesses the wind · American Physical Society, APS News https://www.aps.org/apsnews/2022/07/james-blyth-harnesses-wind
2. James Blyth (1839-1906) · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org//biography/james-blyth-1839-1906
3. Charles Brush Used Wind Power 120 Years Ago · Teaching Cleveland https://teachingcleveland.org/charles-brush-used-wind-power-120-years-ago/
4. Charles Brush and Some Notes on Early Wind Turbine Development (P. Gipe) · Wind-Works https://wind-works.org/charles-brush-and-some-notes-on-early-wind-turbine-development/
5. Charles F. Brush · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_F._Brush
6. Old Wind and Electricity (Engines of Our Ingenuity, episode 552, J. H. Lienhard) · University of Houston https://engines.egr.uh.edu/episode/552
7. Poul la Cour · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Poul_la_Cour
8. The inventor who turned a folk high school into a laboratory · Carlsberg Foundation https://carlsbergfondet.dk/en/anniversary-stories/the-inventor-who-turned-a-folk-high-school-into-a-laboratory/
9. Flashbacks: The First Wind Power Boom · NRECA, RE Magazine https://www.cooperative.com/remagazine/articles/Pages/Flashbacks-The-First-Wind-Power-Boom.aspx
10. Original Company · Jacobs Wind https://jacobswind.net/history/original-company/
11. 79th anniversary of first wind turbine interconnection with the grid in North America (P. Gipe) · Wind-Works https://wind-works.org/79th-anniversary-of-first-wind-turbine-interconnection-with-the-grid-in-north-america/
12. Gedser wind turbine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gedser_wind_turbine
13. How a Wind Turbine Works (text version) · U.S. Department of Energy, Wind Energy Technologies Office https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version
14. Betz limit · Energy Education, University of Calgary https://energyeducation.ca/encyclopedia/Betz_limit
15. Simulation of Variable Speed Wind Turbines based on Open-Source Solutions (2021) · International Journal of Electrical Engineering & Education, via arXiv https://arxiv.org/pdf/2103.01759
16. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development (NREL/TP-500-38060, 2009) · National Renewable Energy Laboratory https://docs.nlr.gov/docs/fy09osti/38060.pdf
17. Small Wind Electric Systems: A U.S. Consumer's Guide (DOE/GO-102007-2465, August 2007) · U.S. Department of Energy / National Renewable Energy Laboratory https://docs.nlr.gov/docs/fy07osti/42005.pdf
18. World electricity data · Ember https://ember-energy.org/countries-and-regions/world/
19. Dongfang installs world's largest single-capacity offshore wind turbine for testing · offshoreWIND.biz https://www.offshorewind.biz/2025/09/03/dongfang-installs-worlds-largest-single-capacity-offshore-wind-turbine-for-testing

Faits vérifiés le 2026-10-14

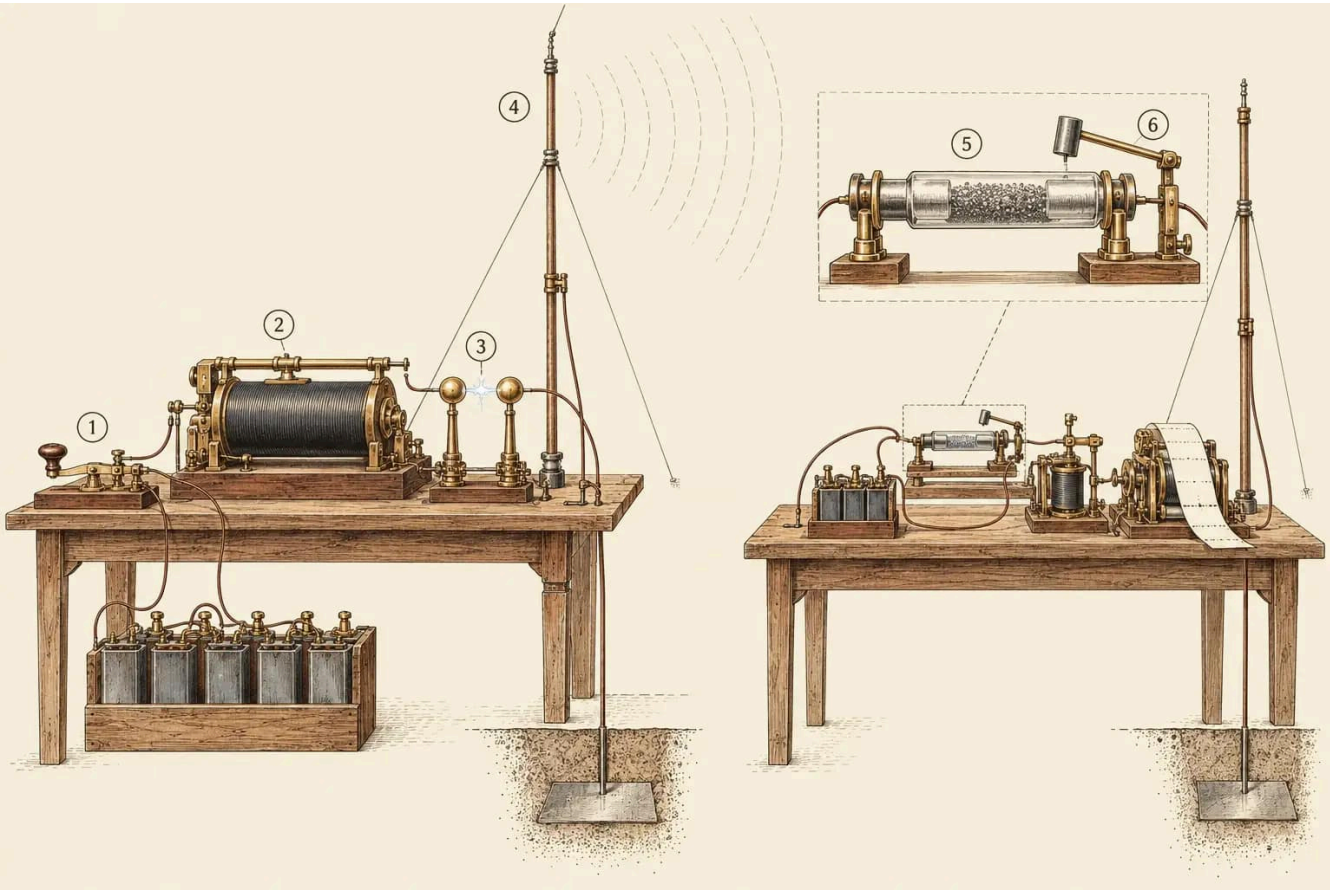
Radio

Des messages sans fil

v. 1895 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Télégraphe électrique (p. 288), Générateur électrique (p. 276)

Mène à : Transistor (p. 364)



1 Manipulateur Morse 2 Bobine d'induction 3 Éclateur 4 Antenne 5 Cohéreur 6 Frappeur

La radio transmet des signaux à travers l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, émises par un courant qui oscille très vite dans un fil et captées par un autre fil au loin. Guglielmo Marconi fit de ces expériences de laboratoire une télégraphie sans fil opérationnelle en 1895, et la radiodiffusion de la parole et de la musique suivit au début du XXe siècle.

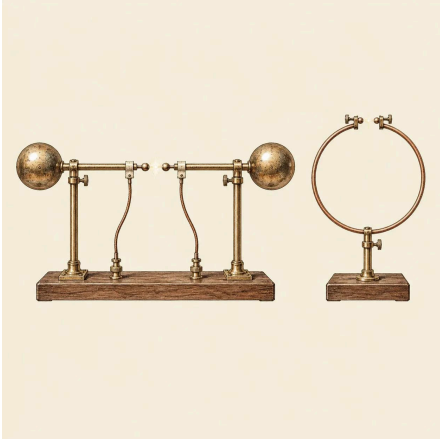
Ce que c'est

Un émetteur radio fait osciller très vite un courant dans un fil, l'antenne, qui émet des ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière. Dans un autre fil, elles font naître une copie minuscule du courant d'origine, qu'un récepteur change en son ou en traits sur du papier.

La planche montre le premier système utilisable, la télégraphie à étincelles de Marconi en 1896, limitée aux points et traits du morse. Au début des années 1920, des stations diffusaient la parole et la musique jusque dans les foyers.

Comment ça marche

Dans l'émetteur, une batterie alimente une bobine d'induction à travers le manipulateur Morse. La bobine élève la tension à plusieurs milliers de volts et charge deux boules de laiton séparées par un petit intervalle, l'éclateur. Quand la tension suffit, une étincelle jaillit et, tant qu'elle dure, laisse la charge aller et venir dans l'antenne à très haute fréquence. Chaque étincelle envoie une brève salve d'ondes. Un appui court sur le manipulateur donne un point à la réception, un appui long un trait.



Quand une étincelle jaillissait dans l'oscillateur de Hertz, une étincelle minuscule sautait dans l'anneau, à l'autre bout de la pièce.

Marconi dressa un long fil vertical sur un mât et relia l'autre côté de l'éclateur à une plaque de métal enterrée. Avec cette antenne mise à la terre, la portée passa de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

Dans le détecteur à moustache de chat, un fil fin posé sur un cristal de galène ne laisse passer le courant que dans un sens.

Le récepteur avait aussi antenne et terre, avec entre elles un cohéreur : un petit tube de verre contenant de la limaille métallique entre deux bouchons d'argent. D'ordinaire, la limaille conduit mal. Les ondes font adhérer les grains : une pile locale y fait alors passer un courant qui actionne un relais, qui commande une sonnerie ou un enregistreur Morse. Un petit marteau, le frappeur, tape ensuite sur le tube pour décoller la limaille avant le signal suivant.

Les émetteurs à étincelles étalaient leur énergie sur une large bande de fréquences et se brouillaient mutuellement. Les circuits accordés, faits d'une bobine et d'un condensateur, permirent à chaque station de garder sa fréquence. Les émetteurs suivants produisirent une onde continue dont l'amplitude suivait la voix : c'est la modulation d'amplitude, ou AM. Dans le récepteur, un détecteur, d'abord un cristal puis une lampe à vide, élimine l'onde radio et ne garde que le son.

Comment la construire

Le récepteur le plus simple est le poste à galène. Sans pile, il tire toute son énergie des ondes de la station. La bobine et le condensateur ci-dessous couvrent une bonne partie des ondes moyennes en AM, selon l'antenne, et le poste marche mieux près d'un émetteur puissant.

Tendre une antenne. Tendre 15 à 30 mètres de fil de cuivre, le plus haut et le plus droit possible, entre deux arbres ou poteaux, isolé à chaque bout, avec un fil de descente jusqu'au poste.

Faire une prise de terre. Enfoncer un piquet de cuivre ou d'acier galvanisé d'un mètre dans un sol humide et le relier par un fil court et épais. Ne jamais utiliser une conduite de gaz.

Bobiner. Sur un tube de carton ou de plastique d'environ 8 cm de diamètre, enrouler 60 à 90 spires jointives de fil de cuivre émaillé de 0,3 à 0,5 mm. Faire une prise toutes les dix spires et gratter l'émail aux points de raccordement.

Ajouter un condensateur d'accord. Un condensateur variable d'environ 350 à 500 picofarads au maximum, acheté ou récupéré sur un vieux poste à piles, se branche aux bornes de la bobine et sélectionne les stations. Ne

pas ouvrir les vieux postes branchés sur le secteur : leurs condensateurs peuvent garder une charge dangereuse longtemps après le débranchement. Sans condensateur variable, on peut encore s'accorder grossièrement en déplaçant l'antenne d'une prise à l'autre.

Monter un détecteur. Une diode au germanium est le plus simple. Un morceau de galène effleuré par un fil fin marche aussi, avec de la patience.

Câbler et écouter. Relier la terre au bas de la bobine et l'antenne à l'une des prises : moins de spires accordent le poste sur des fréquences plus hautes, plus de spires sur des fréquences plus basses, et une longue antenne marche souvent mieux sur une prise intermédiaire. Brancher le détecteur et l'écouteur en série, et placer cet ensemble aux bornes de la bobine. Utiliser un écouteur piézoélectrique à haute impédance avec une résistance d'environ 50 à 100 kilohms à ses bornes, ou un vieux casque du même type ; les écouteurs modernes, à basse impédance, chargent trop le circuit. Tourner lentement le condensateur.

> **Sécurité.** Une antenne extérieure attire la foudre : la débrancher et la relier à la terre avant l'arrivée d'un orage, et ne jamais la toucher pendant. Le piquet de terre du poste ne protège pas de la foudre ; une antenne extérieure permanente exige un parafoudre et une mise à la terre installés selon les règles locales. Tenir tous les fils loin des lignes électriques, dont le contact peut tuer, et ne pas monter sur un toit sans échelle solide ni seconde personne. Ne pas construire d'émetteur : la plupart exigent une licence, et les émetteurs à étincelles sont interdits partout parce qu'ils brouillent les autres services. Les bobines d'induction produisent des milliers de volts et donnent des décharges douloureuses et dangereuses.

Histoire et évolutions

En 1865, James Clerk Maxwell prédit que champs électrique et magnétique pouvaient se propager ensemble sous forme d'ondes. Entre 1886 et 1888, à Karlsruhe, Heinrich Hertz produisit de telles ondes avec des étincelles, les détecta à travers son laboratoire avec un anneau de fil et montra qu'elles se comportaient comme la lumière. Édouard Branly (1890) et Oliver Lodge (1894) mirent au point le cohéreur, un tube de limaille métallique qui devient conducteur à l'arrivée des ondes. Le 7 mai 1895, Alexandre Popov présenta à Saint-Pétersbourg un récepteur à cohéreur à frappe automatique, conçu pour enregistrer les orages lointains.

Guglielmo Marconi, travaillant à la villa familiale Griffone, près de Bologne, visait d'emblée la télégraphie. À l'été 1895, avec une antenne verticale mise à la terre, il envoya des signaux à environ deux kilomètres, au-delà de la colline des Celestini ; de l'autre côté, un aide confirma la réception d'un coup de fusil. En 1896, il s'installa en Angleterre et y déposa son brevet. Le 12 décembre 1901, à Signal Hill (Terre-Neuve), lui et George Kemp entendirent les trois points de la lettre S envoyés depuis Poldhu (Cornouailles), grâce à un fil porté par un cerf-volant. Certains historiens pensent qu'ils n'ont entendu que des parasites, mais un service transatlantique régulier ouvrit en 1907.

La triode amplifiait les signaux faibles, ce qui améliora la réception et aida la radiodiffusion à se répandre.

Le 21 décembre 1906, Reginald Fessenden transmit par radio de la parole et de la musique depuis Brant Rock (Massachusetts), devant des témoins invités. Il écrivit plus tard que, la veille de Noël, il avait diffusé un programme vers des navires en mer ; ce récit date de 1932, et aucun document de 1906 n'en a été retrouvé. Le 2 novembre 1920, la station KDKA de Westinghouse, à Pittsburgh, diffusa les résultats de l'élection présidentielle, et dans les années 1950 les transistors firent tenir les postes dans une poche.

Chiffres clés

Ondes radio mises en évidence
Heinrich Hertz, 1886-1888

Réception transatlantique annoncée par Marconi
12 décembre 1901, la lettre S en morse

Signaux de Marconi au-delà d'une colline
Environ 2 km, été 1895

Parole et musique par radio
21 décembre 1906, démonstration de Fessenden à Brant Rock

Sources

1. Milestones: Marconi's Early Experiments in Wireless Telegraphy, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Marconi%27s_Early_Experiments_in_Wireless_Telegraphy,_1895
2. Milestones: Reception of Transatlantic Radio Signals, 1901 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Reception_of_Transatlantic_Radio_Signals,_1901
3. Milestones: Popov's Contribution to the Development of Wireless Communication, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Popov%27s_Contribution_to_the_Development_of_Wireless_Communication,_1895
4. Experiments and Results in Wireless Telephony (John Grant, 1907) · The American Telephone Journal, via earlyradiohistory.us https://earlyradiohistory.us/1907fes.htm
5. Results by Radio: Election Day 1920 · The Henry Ford https://www.thehenryford.org/collections/explore/articles/detail/articles/2020/10/15/results-by-radio-election-day-1920
6. Fessenden: World's First Broadcaster? · Radio World (James O'Neal) https://www.radioworld.com/news-and-business/fessenden-worlds-first-broadcaster
7. Circular 120: Construction and Operation of a Simple Homemade Radio Receiving Outfit (1922) · US Bureau of Standards, via NIST https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/circ/nbscircular120.pdf
8. Simple Inductance Formulas for Radio Coils (H. A. Wheeler, 1928) · Proceedings of the IRE https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221309
9. Amateur Radio After World War One (1919-1925): 360 and 485 metres set aside for broadcasting, 1921 · Thomas H. White, United States Early Radio History https://earlyradiohistory.us/sec015.htm
10. Government Agricultural Broadcasting: 485 metres for crop reports and weather forecasts · Thomas H. White, United States Early Radio History https://earlyradiohistory.us/agric.htm

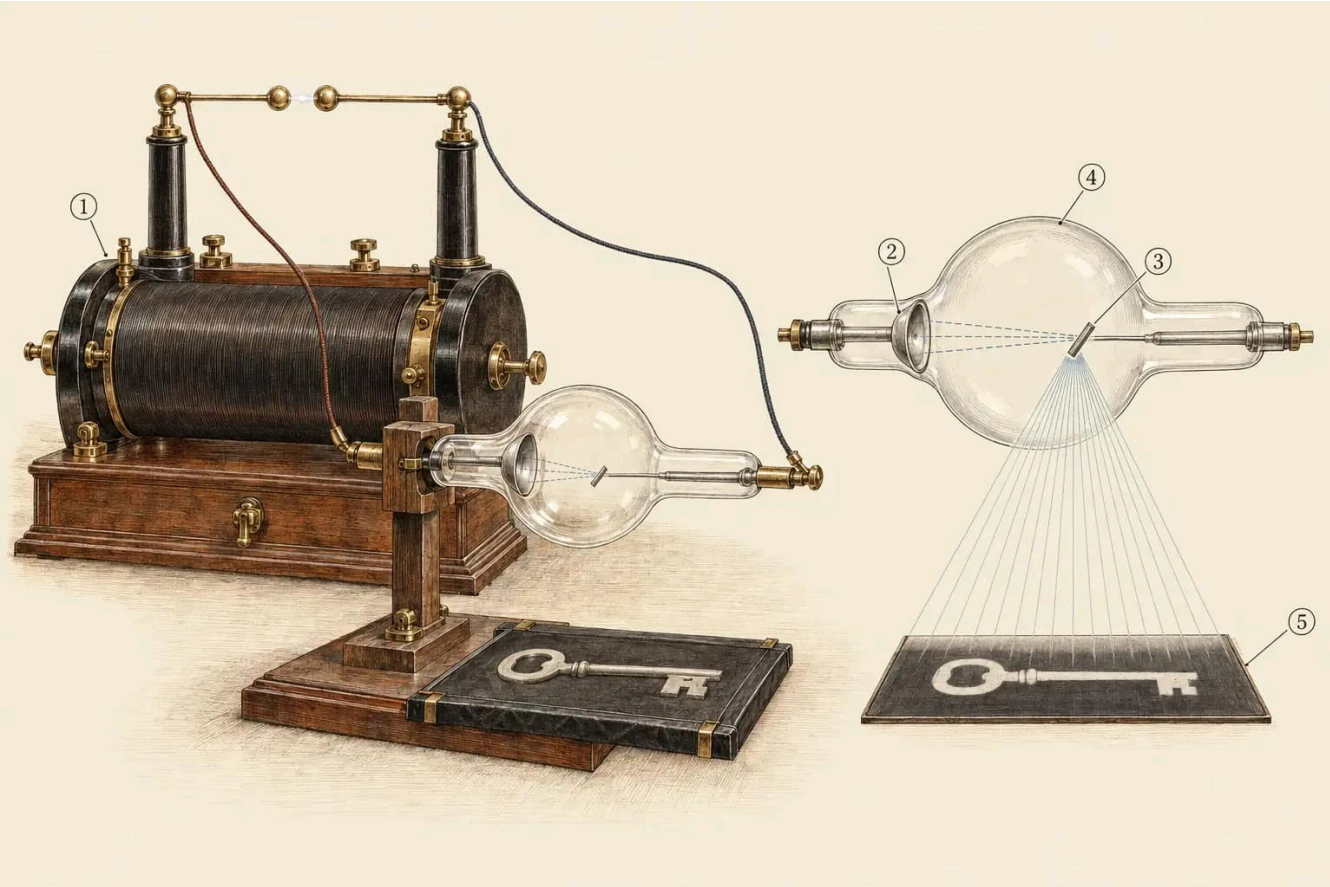
Faits vérifiés le 2026-10-11

Radiographie

Voir à travers le corps

1895 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Générateur électrique (p. 276), Photographie (p. 263)



1 Bobine d'induction 2 Cathode concave 3 Anticathode de platine inclinée 4 Ampoule de verre 5 Plaque photographique

La radiographie fait traverser le corps par des rayons invisibles et pénétrants qui frappent une plaque ou un détecteur, si bien que les os et les tissus denses y projettent leur ombre. Wilhelm Röntgen découvrit ces rayons à Wurtzbourg le 8 novembre 1895, et dès le début de 1896, quelques semaines après leur annonce, des médecins d'Europe et d'Amérique s'en servaient pour repérer fractures et balles.

Ce que c’est

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques comme la lumière, mais de longueur d’onde bien plus courte, de 0,01 à 10 nanomètres environ contre 400 à 700 pour la lumière visible, ce qui leur permet de traverser des matériaux qui arrêtent la lumière. La matière dense en absorbe davantage que la matière légère : un objet placé entre une source de rayons X et une plaque sensible y laisse une image en ombre de son intérieur, et l’os, qui contient du calcium, se détache nettement sur la chair qui l’entoure.

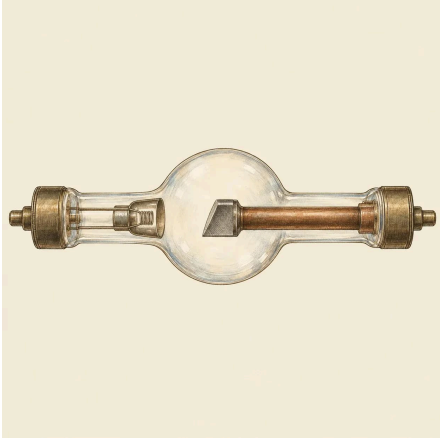
L’appareil de la planche est du type employé en 1896 et dans les années suivantes. Une bobine d’induction transforme la basse tension d’une pile en dizaines de milliers de volts. Deux fils portent cette tension à un tube « focus », une ampoule de verre presque entièrement vidée d’air, avec à un bout une cathode concave en

aluminium et, au centre, une petite plaque de platine, l'anticathode, inclinée à 45 degrés. Sous le tube repose une plaque photographique enveloppée de papier noir, l'objet à radiographier posé dessus.

Comment ça marche

Le tube contient encore une trace de gaz. La haute tension l'ionise, et les ions positifs, en frappant la cathode, en arrachent des électrons que la tension projette ensuite à travers le tube. Ces rayons cathodiques, comme on les appelait alors, sont des flux invisibles d'électrons, et la quantité de gaz restant dans le tube règle leur comportement. La cathode concave les concentre sur une petite tache de l'anticathode de platine. Quand les électrons rapides sont arrêtés dans le métal, une petite part de leur énergie ressort sous forme de rayons X ; presque tout le reste devient chaleur. Les rayons X partent de la cible dans de nombreuses directions ; comme elle est inclinée, un faisceau utile sort sur le côté, à travers le verre, vers la plaque photographique, tandis que le reste se répand dans la pièce faute de protection.

Les rayons partent en ligne droite de cette petite tache, d'où son importance : plus la tache est petite, plus les ombres sont nettes. Là où les rayons passent facilement, dans l'air ou la chair, ils noircissent l'émulsion photographique ; là où l'os ou le métal les absorbe, la plaque reste plus claire. Tirée ou regardée directement, la plaque montre le squelette d'une main, une pièce dans une bourse ou une balle dans un membre.



Le tube de Coolidge de 1913 : un filament de tungstène chauffé fournit les électrons, ce qui permet de régler précisément l'émission.

Les premiers tubes à gaz étaient capricieux : leur comportement changeait à mesure que le gaz restant s'épuisait. En 1913, William Coolidge, chez General Electric, fit un tube à vide poussé dont la cathode était un filament de tungstène chauffé. Le courant, et avec lui la quantité de rayons X, se réglait désormais par la température du filament, et leur pouvoir pénétrant par la tension, ce qui rendit les doses reproductibles. Les tubes modernes suivent encore ce principe.

Comment le fabriquer

Un appareil à rayons X ne peut pas être construit sans danger à la maison, et dans la plupart des pays son utilisation exige une autorisation. Les rayons X lèsent les cellules vivantes sans qu'on les sente ; les premiers opérateurs l'ont appris par des brûlures, des amputations et des cancers mortels. Cette section décrit comment les premières machines étaient faites dans les laboratoires, puis propose deux expériences simples qui montrent les mêmes principes.

Comment on faisait en 1896. Les fabricants d'instruments bobinaient des kilomètres de fil fin guipé de soie sur un noyau de fer, alimentaient ces bobines par des piles à travers un interrupteur vibrant et les reliaient à des tubes faits par des souffleurs de verre. On vidait les tubes pendant des heures à la pompe à mercure, on les scellait, puis on les rodait jusqu'à ce qu'ils donnent des rayons réguliers. Un châssis enveloppé de papier noir était posé sous le tube ; une main demandait d'abord plusieurs minutes de pose, parfois bien davantage, puis moins à mesure que les tubes s'amélioraient.

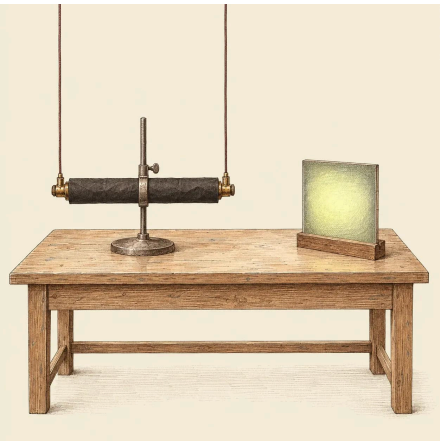
Voir des ombres avec la lumière. Dans une pièce obscure, fixer une lampe de poche vive à environ 2 m d'un mur et tenir un crayon à mi-chemin. Couvrir la lampe d'un carton percé d'un trou de 5 mm, puis l'ôter pour que toute la lentille éclaire : la petite source donne une ombre nette, la grande des bords flous, exactement comme une petite

tache focale dans un tube à rayons X. Puis appuyer la lampe contre le bout d'un doigt : il rougeoie, parce que la lumière rouge traverse un centimètre de chair.

Voir la fluorescence. Röntgen remarqua les rayons parce qu'un écran enduit de platinocyanure de baryum s'illuminait. Sous la responsabilité d'un adulte et en suivant les consignes de la lampe, éclairer dans le noir un verre d'eau tonique avec une lampe ultraviolette de faible puissance, de type « UV-A » à 365 nm : la quinine qu'elle contient absorbe cette lumière invisible et brille en bleu. L'encre des surligneurs et certaines lessives font de même.

> **Sécurité.** Ne mettez jamais de vieux tubes à vide ou tubes cathodiques sous haute tension : quand des électrons frappent le verre ou le métal à l'intérieur, ils peuvent émettre des rayons X. Les bobines d'induction et autres alimentations haute tension peuvent donner des décharges dangereuses, voire mortelles. L'ultraviolet abîme les yeux et la peau : ne regardez jamais dans la lampe, tenez le faisceau loin des yeux et de la peau, portez des lunettes anti-UV et choisissez une lampe de faible puissance vendue pour l'UV-A seulement. Les radiographies médicales sont faites par du personnel formé, à la dose la plus faible que permet l'examen.

Histoire et évolution



La découverte de Röntgen : un tube enveloppé de carton noir, et à côté un écran fluorescent qui luit malgré tout.

Le soir du 8 novembre 1895, Wilhelm Conrad Röntgen, professeur de physique à Wurtzbourg, étudiait une décharge électrique dans un tube enveloppé de carton noir. Un écran de papier enduit de platinocyanure de baryum, posé à quelque distance, s'illuminait chaque fois que le tube était mis sous tension, alors qu'aucune lumière ne pouvait sortir du carton. Dans les semaines qui suivirent, travaillant seul, il montra que ces rayons inconnus traversaient le papier, le bois et la chair, mais étaient bien plus absorbés par l'os et par des métaux comme le plomb. Le 22 décembre, il photographia la main de sa femme, Anna Bertha, où l'on voit les os et son anneau. Son article « Sur une nouvelle sorte de rayons » parut à la fin du mois.

Dès le début de 1896, la plaque montrait au chirurgien où se trouvait une aiguille ou une balle avant qu'il n'incise.

La nouvelle se répandit à une vitesse extraordinaire, et quelque mille publications sur les rayons X parurent en un an. Au début de 1896, Herbert Jackson à Londres et d'autres construisirent des tubes « focus » à cathode concave et cible métallique inclinée, qui donnaient des images bien plus nettes. Les chirurgiens s'en servirent pour localiser balles et aiguilles ; les hôpitaux s'équipèrent de salles de radiographie. Röntgen reçut en 1901 le premier prix Nobel de physique.

On ne comprit pas tout de suite le danger. Des brûlures et des chutes de cheveux furent signalées dès 1896, et beaucoup des premiers opérateurs subirent des lésions défigurantes ; Clarence Dally, assistant de Thomas Edison, mourut en 1904 après des années d'exposition. Écrans de plomb, limites de dose et formation suivirent. En 1912, l'équipe de Max von Laue montra que les rayons X sont des ondes en les diffractant à travers des cristaux, ce qui ouvrit l'étude des structures cristallines. La tomodensitométrie, qui reconstruit des coupes à partir de nombreuses mesures aux rayons X, valut en 1979 le prix Nobel à Godfrey Hounsfield et Allan Cormack.

Chiffres clés

Découverte
8 novembre 1895, université de Wurtzbourg

Publication
« Über eine neue Art von Strahlen », fin décembre 1895 ; environ 1 000 publications sur les rayons X en un an

Premier prix Nobel de physique
Röntgen, 1901

Première radiographie d'une main
Celle d'Anna Bertha Röntgen, 22 décembre 1895

Tube à cathode chaude
William Coolidge, 1913

Sources

1. Wilhelm Conrad Röntgen: biographical · Nobel Prize Outreach https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/biographical/
2. Röntgen discovers X-rays · HistoryofInformation.com https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=550
3. Jackson X-ray tube (ca. 1896) · ORAU Health Physics Historical Instrumentation Museum https://www.orau.org/health-physics-museum/collection/x-ray-discharge/after-roentgen-tubes/jackson-x-ray-tube.html
4. Original Coolidge x-ray tube · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co32668/original-coolidge-x-ray-tube
5. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1979 · Nobel Prize Outreach https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979/summary/
6. History of radiation protection · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radiation_protection
7. John Francis Hall-Edwards: a radiology pioneer · Hektoen International https://hekint.org/2020/06/23/john-francis-hall-edwards-a-radiology-pioneer/
8. Blue plaque: Major Dr John Francis Hall-Edwards · Birmingham Civic Society https://birminghamcivicsociety.org.uk/blue-plaque-major-dr-john-francis-hall-edwards/
9. X-Ray Mass Attenuation Coefficients (NIST Standard Reference Database 126) · National Institute of Standards and Technology https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/
10. Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students, chapter 5 · International Atomic Energy Agency https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1564webNew-74666420.pdf
11. Characteristics of a first-generation x-ray system · Radiology (Radiological Society of North America) https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.11101899
12. X-ray (the Duane–Hunt law) · Encyclopaedia Britannica https://www.britannica.com/science/X-ray

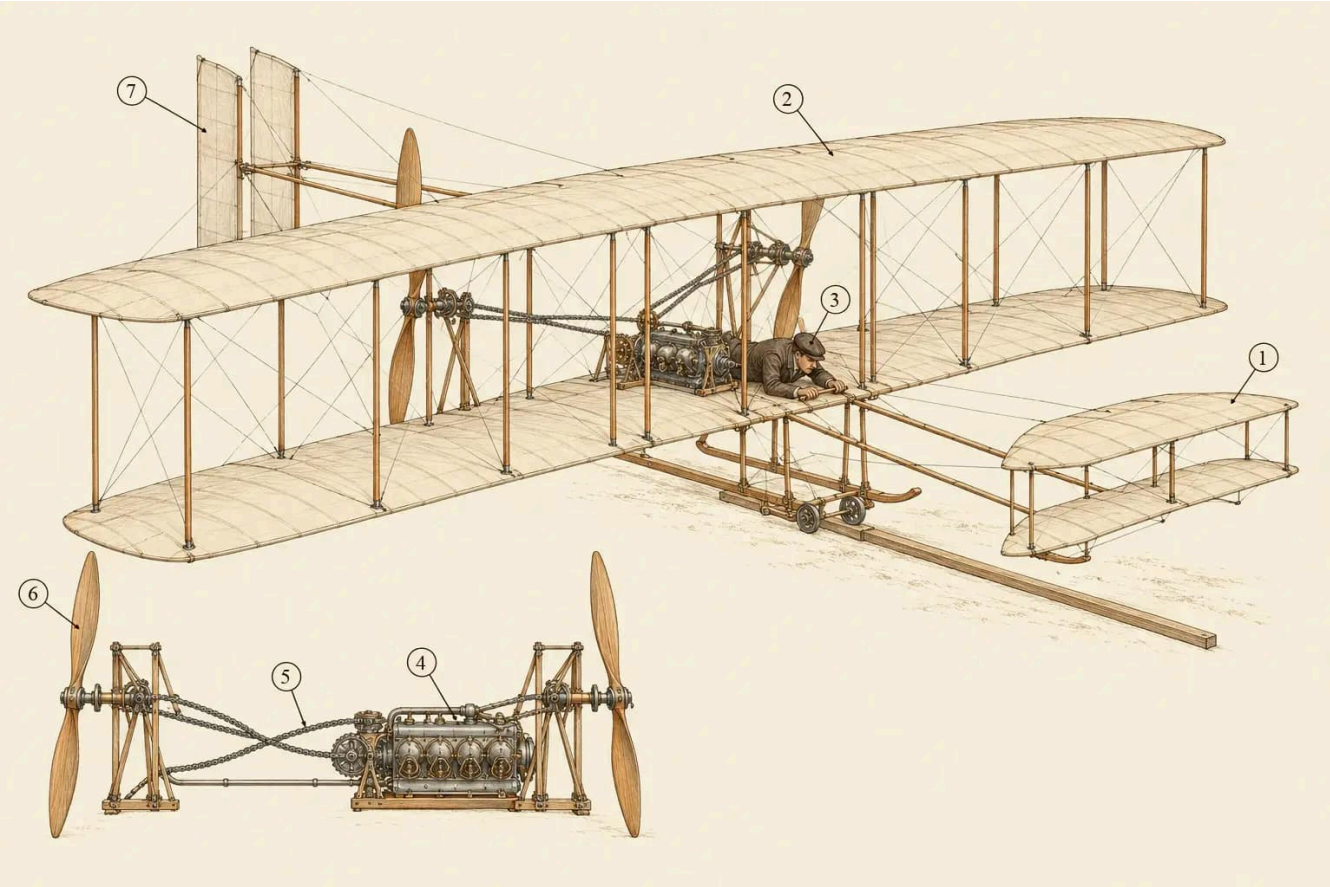
Faits vérifiés le 2026-10-12

Avion

Portance, poussée et contrôle

1903 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite : Moteur à combustion interne (p. 316), Aluminium (p. 338)



1 Gouvernail de profondeur avant 2 Aile supérieure 3 Berceau du pilote 4 Moteur 5 Chaîne de transmission 6 Hélice 7 Gouvernails de direction jumeaux

Un avion est une machine motorisée plus lourde que l'air qui vole grâce à des ailes fixes, avec un moteur pour avancer et des gouvernes pour se diriger. Wilbur et Orville Wright ont réussi les premiers vols motorisés contrôlés et soutenus à Kitty Hawk, le 17 décembre 1903.

Ce que c'est

Un avion vole parce que l'air qui s'écoule autour de ses ailes le soutient. À la différence d'un ballon, il est plus lourd que l'air ; il doit donc avancer sans cesse pour rester en l'air. Il lui faut tout à la fois des ailes qui produisent de la portance, un moteur et une hélice (ou un réacteur) qui le poussent contre la traînée, et des commandes qui permettent au pilote de le garder en équilibre et de le diriger.

L'appareil de la planche est le Flyer des frères Wright, en 1903 : un biplan en épicéa et en frêne entoilé de mousseline écrue. Le pilote était couché à plat ventre sur l'aile inférieure. À côté de lui, un petit moteur à essence entraînait par des chaînes semblables à celles d'une bicyclette deux hélices en bois placées derrière les ailes. Le

gouvernail de profondeur se trouvait à l'avant, une paire de gouvernails de direction à l'arrière. Sans roues, l'appareil décollait d'un rail de bois posé sur le sable.

Comment ça marche

Une aile est bombée sur le dessus et légèrement inclinée par rapport à l'air qui arrive. Elle dévie l'air vers le bas, et l'air la repousse vers le haut. La pression baisse au-dessus de l'aile et augmente en dessous ; cette différence, répartie sur toute la surface, donne la portance. Pour une aile et un angle donnés, la portance croît avec le carré de la vitesse ; un avion a donc besoin d'une vitesse minimale pour voler. Incliner davantage l'aile n'augmente la portance que jusqu'à un certain point : au-delà, l'écoulement se détache de l'extrados et l'aile décroche.

L'air qui contourne une aile cambrée est dévié vers le bas, et l'aile est poussée vers le haut en retour.

Le moteur doit vaincre la traînée, c'est-à-dire la résistance de l'air. Les Wright considéraient leurs hélices comme des ailes en rotation et les ont dessinées à partir de leurs propres mesures en soufflerie. Les deux hélices tournaient en sens contraire pour que leurs effets de couple s'annulent.

Le contrôle a été le grand apport des Wright. Un avion tourne autour de trois axes. Le tangage (nez en haut ou en bas) se réglait avec le gouvernail de profondeur avant, manœuvré par un levier dans la main gauche du pilote. Le roulis venait du gauchissement des ailes : en déplaçant ses hanches dans le berceau, le pilote tirait des câbles qui tordaient les extrémités des ailes en sens opposé, si bien qu'une aile portait davantage que l'autre. Le même berceau actionnait les gouvernails de direction pour empêcher le nez de partir du mauvais côté dans un virage. Les ailerons, volets articulés sur les ailes, ont ensuite remplacé le gauchissement, mais le principe des trois axes est resté.

Comment le construire

Les premiers avions sortaient de petits ateliers qui maîtrisaient le travail du bois et la mécanique de bicyclette. Ce qui suit présente les choix à faire et la méthode des pionniers. Ce n'est pas un plan : personne ne devrait faire voler un aéronef de construction artisanale sans formation, sans inspection et sans les autorisations exigées dans son pays.

Tester avant de construire. Les Wright ont fait voler des planeurs en 1900, 1901 et 1902, et construit en 1901 une petite soufflerie pour mesurer la portance et la traînée de maquettes d'ailes. Leurs propres tables ont remplacé des données publiées qu'ils avaient trouvées fausses.

Une structure en bois léger à fil droit. Longerons et mâts en épicéa, nervures cintrées en frêne. L'ensemble formait une structure en treillis haubanée : les mâts tenaient les deux ailes écartées et des fils d'acier se croisaient entre eux. Les travées centrales étaient rigides, tandis que les parties extérieures des ailes pouvaient se tordre légèrement pour le gauchissement.

Entoiler les ailes. La mousseline était coupée et tendue en biais sur les nervures, fils en diagonale, ce qui renforçait l'entoilage.

Trouver un moteur léger. Faute de trouver un fabricant prêt à leur fournir un moteur assez léger et assez puissant, les Wright ont confié le travail à leur mécanicien Charlie Taylor, qui a construit en six semaines environ un quatre-cylindres à refroidissement par eau, dont le carter était coulé en aluminium pour gagner du poids.

Équilibrer l'appareil. Dans le sens longitudinal, le centre de gravité doit se trouver au bon endroit par rapport à la portance, sinon l'avion se cabre ou pique. Latéralement, les masses doivent aussi s'équilibrer : le moteur étant placé à côté du pilote, les Wright ont un peu allongé l'aile droite pour compenser.

> **Sécurité.** Une hélice en rotation est invisible et peut tuer : ne vous tenez jamais dans son champ et ne lancez jamais un moteur à la main sans formation. L'essence et ses vapeurs s'enflamment facilement. Une structure de bois et de toile peut céder sans prévenir si un assemblage ou un hauban est abîmé. Voler exige une formation, un appareil sain et inspecté, et une météo adaptée.

Histoire et évolution

Lilienthal dirigeait ses planeurs en déplaçant le poids de son corps sous les ailes.

L'approche moderne du vol commence avec l'Anglais George Cayley. Vers 1799, il sépare les trois problèmes de la portance, de la propulsion et du contrôle, puis fait voler des planeurs. En Allemagne, dans les années 1890, Otto Lilienthal effectue environ deux mille vols planés depuis des collines et publie ses mesures. Il meurt en 1896 des suites d'une chute.

Wilbur et Orville Wright tenaient un commerce de bicyclettes à Dayton, dans l'Ohio. Ils étudient les recherches antérieures, dont celles de Lilienthal, puis testent leurs idées avec des cerfs-volants et des planeurs à Kitty Hawk, en Caroline du Nord, choisie pour ses vents réguliers et son sable meuble.

Le 17 décembre 1903, Orville vole 12 secondes et parcourt environ 37 mètres (120 pieds). Les deux frères font trois autres vols ce jour-là ; le dernier, piloté par Wilbur, dure 59 secondes et couvre environ 260 mètres. Une rafale retourne ensuite l'appareil, qui ne volera plus jamais. Il est exposé à la Smithsonian, à Washington, depuis 1948.

Dans leur soufflerie de 1901, les Wright ont mesuré la portance et la traînée de nombreuses maquettes d'ailes.

D'autres suivent rapidement. Alberto Santos-Dumont vole à Paris en 1906, Louis Blériot traverse la Manche en 1909. La Première Guerre mondiale fait de l'aviation une industrie. Dans les années 1930, les monoplans métalliques remplacent les biplans en bois, et les premiers moteurs à réaction apparaissent à la fin de la décennie. Les avions de ligne transportent aujourd'hui plusieurs centaines de passagers au-dessus des océans, et leurs commandes agissent toujours autour des trois axes sur lesquels les Wright ont les premiers obtenu un contrôle efficace.

Chiffres clés

Premier vol
17 décembre 1903, 12 secondes, environ 37 m

Plus long vol de la journée
59 secondes, environ 260 m (Wilbur Wright)

Envergure du Flyer de 1903
12,3 m

Moteur
4 cylindres, environ 12 ch, carter en aluminium

Masse
274 kg à vide, 341 kg avec le pilote

Sources

1. 1903 Wright Flyer · Smithsonian National Air and Space Museum https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000
2. The Wright Flyer · US National Park Service https://www.nps.gov/articles/wrightflyer.htm
3. 1903 Engine · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Engines_&_Props/1903_Engine.htm
4. Otto Lilienthal · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Lilienthal
5. 1903 Wright Flyer Specifications · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Help_with_Homework/Wright_Plans/Wright_Plans_images/1903_Wright_Flyer_Specifications_Isometric_11x17.pdf
6. 1903 Wright Propellers · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Engines_&_Props/1903_Props.htm
7. Wright 1903 Aircraft Engine Parts · NASA Glenn Research Center https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/engparts.html

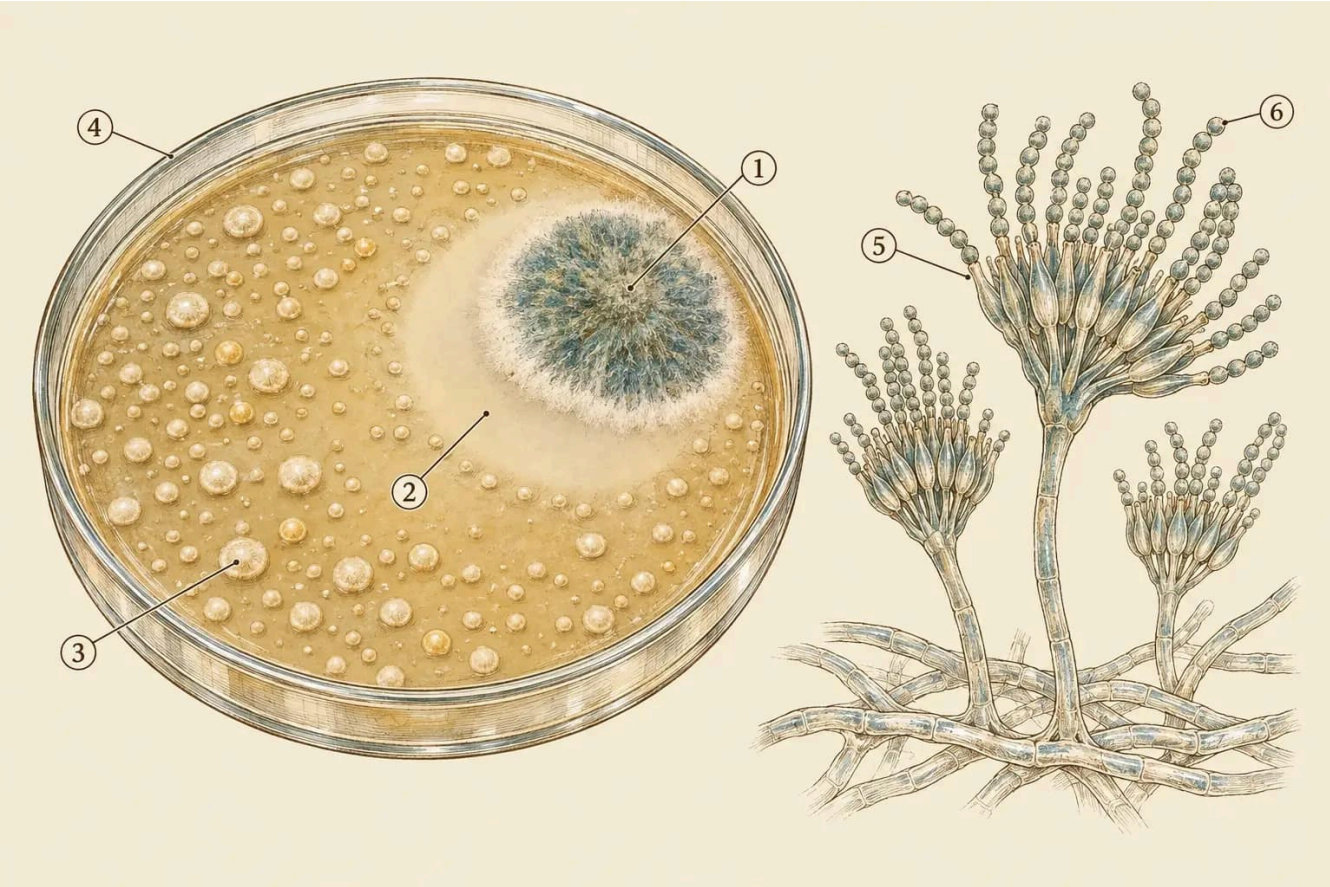
Faits vérifiés le 2026-10-11

Pénicilline

Un antibiotique produit par une moisissure

1928 · Âge électrique · Âge électrique

Nécessite: Verre (p. 134), Vaccination (p. 237), Hygiène et antisepsie (p. 301)



1 Colonie de Penicillium 2 Zone claire autour de la moisissure 3 Colonies bactériennes 4 Boîte de Petri en verre
5 Tête sporifère en pinceau 6 Chaîne de spores

La pénicilline est une substance produite par des moisissures du genre Penicillium; elle tue de nombreuses bactéries en les empêchant de construire leur paroi. Alexander Fleming l'a remarquée en 1928, et une équipe d'Oxford en a fait, pendant la Seconde Guerre mondiale, le premier antibiotique issu d'une moisissure à entrer dans l'usage médical courant.

Ce que c’est

La pénicilline est un antibiotique, c’est-à-dire un médicament qui tue les bactéries ou arrête leur croissance. À la différence des sulfamides de synthèse des années 1930, issus de recherches sur les colorants, elle est produite par un être vivant. Certaines souches de *Penicillium*, un genre qui comprend les moisissures bleu-vert du vieux pain et des fruits, la fabriquent. Une fois purifiée, la pénicilline est devenue le premier antibiotique issu d’une moisissure que les médecins ont pu employer largement, et elle a changé le pronostic d’infections souvent mortelles comme la septicémie, la pneumonie ou les plaies infectées. La moisissure des aliments, elle, n’est pas un médicament et peut même être nocive.

À gauche, la planche montre la célèbre observation de Fleming : une boîte de verre couverte de colonies bactériennes, sur laquelle une spore de moisissure s'est posée par hasard et a donné une colonie, entourée d'un anneau clair où les bactéries ont disparu. À droite, la moisissure elle-même au microscope. Ses spores poussent en chaînes sur de petites têtes en forme de pinceau, d'où le nom du genre, tiré du latin *penicillus*, petit pinceau.

Comment ça marche

La plupart des bactéries sont des cellules uniques enveloppées d'une paroi solide qui leur permet de conserver leur forme contre la pression de l'eau qu'elles contiennent. Cette paroi est un treillis de chaînes de sucres reliées par de courts ponts peptidiques. En grandissant et en se divisant, la cellule coupe et reconstruit sans cesse ce treillis.

La pénicilline bloque les enzymes bactériennes qui forment ces ponts. La cellule continue de grandir, mais sa nouvelle paroi est fragile ; l'eau entre et la cellule éclate. Les cellules humaines et animales n'ont pas de paroi de ce genre, ce qui explique que la pénicilline tue les bactéries en épargnant en grande partie les cellules du malade. Au cœur de la molécule se trouve un cycle de quatre atomes très tendu, le cycle bêta-lactame, qui réagit avec ces enzymes et les met hors d'usage.

La pénicilline agit surtout sur les bactéries à paroi épaisse et exposée, comme les streptocoques et les pneumocoques. La bactérie de la syphilis, dont la paroi mince est prise entre deux membranes, y est pourtant très sensible elle aussi. La pénicilline est sans effet sur les virus, qui n'ont pas de paroi du tout.

Les bactéries peuvent devenir résistantes. Certaines fabriquent une enzyme, la pénicillinase, qui coupe le cycle bêta-lactame avant qu'il n'agisse. Chaque utilisation d'un antibiotique favorise les bactéries qui y survivent, et la résistance se répand là où l'on emploie les antibiotiques sans discernement. Fleming en avertissait déjà dans sa conférence Nobel de 1945. Certaines personnes sont en outre allergiques à la pénicilline, parfois gravement. Les antibiotiques sont des médicaments qui ne s'utilisent que sur prescription médicale.

Comment on la fabrique

Entre 1940 et 1945, les façons de cultiver la moisissure, d'extraire le médicament du bouillon et de le doser changèrent plusieurs fois.

La culture en surface à Oxford. L'équipe de Florey cultivait la souche de Fleming, *Penicillium notatum*, sous forme d'un feutre flottant sur une mince couche de bouillon nutritif. Norman Heatley utilisa d'abord tout ce qui avait un fond large et plat, bassins de lit, boîtes à biscuits et plats à tarte, puis dessina un récipient rectangulaire en céramique qu'on pouvait empiler couché pendant l'incubation. Une faïencerie du Staffordshire, James Macintyre & Co., en fabriqua plusieurs centaines, et les premiers furent ensemencés à Noël 1940. Une petite équipe de jeunes femmes, surnommées les « penicillin girls », semait les spores, soutirait le bouillon une fois que la moisissure y avait libéré sa pénicilline et faisait tourner les récipients jour et nuit.

Norman Heatley conçut des récipients en céramique de ce genre pour cultiver la moisissure en quantité à Oxford.

L'extraction. Le bouillon ne contenait qu'une trace de pénicilline, et le médicament se dégradait en quelques heures à la chaleur ou en milieu acide. Heatley tira parti du fait que la pénicilline est un acide. Acidifiée et maintenue au froid, elle passe du bouillon dans un solvant non miscible à l'eau, d'abord l'éther, puis l'acétate d'amyle, moins inflammable. Agitée

avec de l'eau rendue légèrement alcaline, elle repasse dans l'eau sous forme de sel, dans un volume bien plus petit et débarrassée d'une bonne partie des impuretés. Avec des tubes de verre, des flacons et des pompes, Heatley construisit un appareil qui faisait ce travail en continu. La solution concentrée était ensuite lyophilisée en une poudre brune qui se conservait des mois, même si les premiers lots étaient surtout faits d'impuretés.

Le dosage en cylindres de Heatley : plus l'échantillon versé dans un cylindre est actif, plus l'anneau clair qui l'entoure est large.

Le dosage. Tant qu'on ignorait sa structure, on ne pouvait mesurer la pénicilline que par son effet sur les bactéries. Dans le dosage en cylindres mis au point par Heatley, de petits cylindres ouverts sont posés sur une boîte de gélose ensemencée de staphylocoques, et chacun reçoit un échantillon. La pénicilline diffuse dans la gélose ; après incubation, la largeur de l'anneau clair autour de chaque cylindre, comparée à celle d'un étalon, donne la concentration. L'équipe d'Oxford définit ainsi sa propre unité et envoya des échantillons à d'autres laboratoires. En 1944 et 1945, des scientifiques britanniques et américains s'accordèrent sur une unité internationale, égale à 0,6 microgramme de benzylpénicilline sodique pure et proche de l'unité d'Oxford, et préparèrent des échantillons étalons.

Les cuves profondes aux États-Unis. Au Northern Regional Research Laboratory de Peoria, Andrew Moyer, avec Heatley, multiplia les rendements par dix environ à la fin de 1941 en ajoutant au bouillon de la liqueur de trempage du maïs, un sous-produit de l'amidonnerie. Le laboratoire essaya des moisissures envoyées du monde entier, et une souche de *Penicillium chrysogenum* (classée aujourd'hui *P. rubens*), trouvée sur un melon moisi acheté à Peoria, se révéla la meilleure. Les souches qui en furent tirées, dont des mutants obtenus aux rayons X et aux ultraviolets, firent mieux encore. Le changement le plus important fut de cultiver la moisissure dans toute l'épaisseur du liquide et non plus à sa surface, dans des cuves d'acier fermées, brassées et alimentées en air stérile. Pfizer employait déjà cette méthode pour l'acide gluconique ; le 1er mars 1944 (une source indique 1943), la firme ouvrit à Brooklyn, dans une ancienne fabrique de glace, la première grande usine de pénicilline, avec quatorze cuves de 7 500 gallons américains (environ 28 000 litres) chacune. Un seul microbe égaré pouvait gâter toute une cuve : on stérilisait le bouillon et les cuves avant d'introduire la moisissure, puis l'air et les tuyaux tenaient les autres organismes à l'écart pendant sa croissance.

La fermentation en cuves profondes, aux États-Unis, fit de la pénicilline un produit industriel.

Les pénicillines semi-synthétiques. La fermentation donne surtout la benzylpénicilline, ou pénicilline G, en particulier quand on ajoute au bouillon de l'acide phénylacétique, que la moisissure incorpore à la molécule. En 1957, des chimistes des Beecham Research Laboratories, dans le Surrey, isolèrent le noyau nu de la molécule, l'acide 6-aminopénicillanique, et publièrent leurs travaux en 1959. En greffant de nouvelles chaînes latérales sur ce noyau, les chimistes obtinrent des pénicillines qui résistent à l'acidité de l'estomac ou à l'enzyme bactérienne appelée pénicillinase, ou qui agissent sur davantage de bactéries, comme la cloxacilline et l'amoxicilline. Aujourd'hui, le noyau est en général détaché de la pénicilline fermentée par une enzyme, et les usines contrôlent l'identité, la pureté et l'activité de chaque lot, et la stérilité des formes injectables, avant sa libération.

> **Sécurité.** Cette section décrit la production en laboratoire et en usine. On ne peut pas fabriquer de pénicilline sans danger chez soi : la moisissure du pain ou des fruits n'en contient que peu ou pas, peut appartenir à des espèces qui produisent des toxines, et une préparation impure peut provoquer une infection grave ou un choc. La pénicilline peut aussi déclencher de graves réactions allergiques ; elle ne s'emploie que sur ordonnance.

Histoire et évolution

On avait remarqué depuis des siècles que certaines moisissures semblaient aider à guérir les plaies, et dans les années 1890 plusieurs chercheurs signalèrent que des moisissures pouvaient freiner les bactéries. Aucune de ces observations n'aboutit à un traitement.

Alexander Fleming, bactériologiste à l'hôpital St Mary de Londres, partit en vacances à l'été 1928. À son retour, début septembre, il remarqua qu'une boîte de staphylocoques avait été contaminée par une moisissure et que les colonies voisines s'étaient effacées. Il cultiva la moisissure, montra que son bouillon tuait de nombreuses bactéries, baptisa la substance active pénicilline et publia ses résultats en 1929. Mais la pénicilline était instable et difficile à extraire, et Fleming ne parvint pas à en obtenir assez sous forme pure pour soigner des malades.

Dix ans plus tard, à Oxford, Howard Florey et Ernst Chain reprirent le problème. Norman Heatley mit au point l'extraction et la concentration de la pénicilline, et l'équipe cultiva la moisissure dans des centaines de récipients. Le 25 mai 1940, ils infectèrent huit souris avec des streptocoques et en traitèrent quatre. Le lendemain matin, les quatre souris non traitées étaient mortes et les souris traitées encore en vie. En février 1941, un policier, Albert Alexander, fut l'un des premiers patients. Son état s'améliora d'abord, mais la réserve s'épuisa et il mourut.

La Grande-Bretagne en guerre ne pouvait pas produire de pénicilline à grande échelle ; en 1941, Florey et Heatley partirent donc aux États-Unis, où un laboratoire public de Peoria, dans l'Illinois, et plusieurs firmes pharmaceutiques reprirent le travail. En mars 1942, les réserves américaines suffisaient à soigner un seul malade. En 1944, les usines en produisaient assez pour les armées alliées, et à partir du 15 mars 1945 elle fut distribuée aux pharmacies américaines par les circuits commerciaux ordinaires.

Fleming, Florey et Chain se partagèrent le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1945. La même année, Dorothy Hodgkin détermina la structure de la pénicilline par cristallographie aux rayons X. Entre-temps, la recherche d'autres antibiotiques avait abouti à la streptomycine, découverte en 1943 ; les tétracyclines et bien d'autres suivirent, et les chimistes créèrent plus tard de nouvelles pénicillines en modifiant la molécule.

Chiffres clés

Observation de Fleming
Septembre 1928, hôpital St Mary, Londres

Expérience sur les souris à Oxford
25 mai 1940

Première grande usine en cuves profondes
Pfizer, Brooklyn, 1er mars 1944, quatorze cuves de 7 500 gallons américains (environ 28 000 litres)

Première publication
Juin 1929, British Journal of Experimental Pathology

Prix Nobel de physiologie ou médecine
1945, Fleming, Florey et Chain

Sources

1. Alexander Fleming · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/alexander-fleming/
2. Howard Walter Florey · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp38732/howard-walter-florey
3. The real story behind the world's first antibiotic · PBS NewsHour https://www.pbs.org/newshour/health/the-real-story-behind-the-worlds-first-antibiotic
4. History of penicillin · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_penicillin
5. “It looks like a miracle”: penicillin production in Oxford · History of Science Museum, University of Oxford https://www.mhs.ox.ac.uk/backfromthedead/exhibition/production/
6. Pfizer's penicillin pioneers: Jasper Kane and John McKeen · The Chemical Engineer (IChemE) https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-pfizers-penicillin-pioneers-jasper-kane-and-john-mckeen/
7. How a moldy cantaloupe took Fleming's penicillin from discovery to mass production · The Scientist https://the-scientist.com/how-a-moldy-cantaloupe-took-fleming-s-penicillin-from-discovery-to-mass-production-72304
8. Standardizing the 'magic bullet' · Inventing Europe https://www.inventingeurope.eu/story/standardizing-the-magic-bullet
9. The Discovery of Penicillin · Sir William Dunn School of Pathology, University of Oxford https://www.path.ox.ac.uk/centenary/the-discovery-of-penicillin/
10. Biochromatograms showing the first ever acylation of 6-APA · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8997116/biochromatograms-showing-the-first-ever-acylation-of-6-apa
11. Penicillin culture vessel, 1940–41 (National Museum of American History, M-06669) · Cooper Hewitt, Smithsonian Design Museum https://collection.cooperhewitt.org/objects/35457197/
12. Further observations on penicillin (The Lancet, 16 August 1941) · University of Oxford, NDORMS https://www.ndorms.ox.ac.uk/files/news/19410816_florey_furtherobservationsonpenicillin_lancet.pdf
13. Alexander Fleming, On the antibacterial action of cultures of a penicillium (1929), reprinted 2001 · Bulletin of the World Health Organization https://scielosp.org/article/bwho/2001.v79n8/780-790
14. Making penicillin in milk bottles: a tale of wartime antibiotic manufacture · The Pharmaceutical Journal https://pharmaceutical-journal.com/article/opinion/making-penicillin-in-milk-bottles-a-tale-of-wartime-antibiotic-manufacture

Faits vérifiés le 2026-10-12

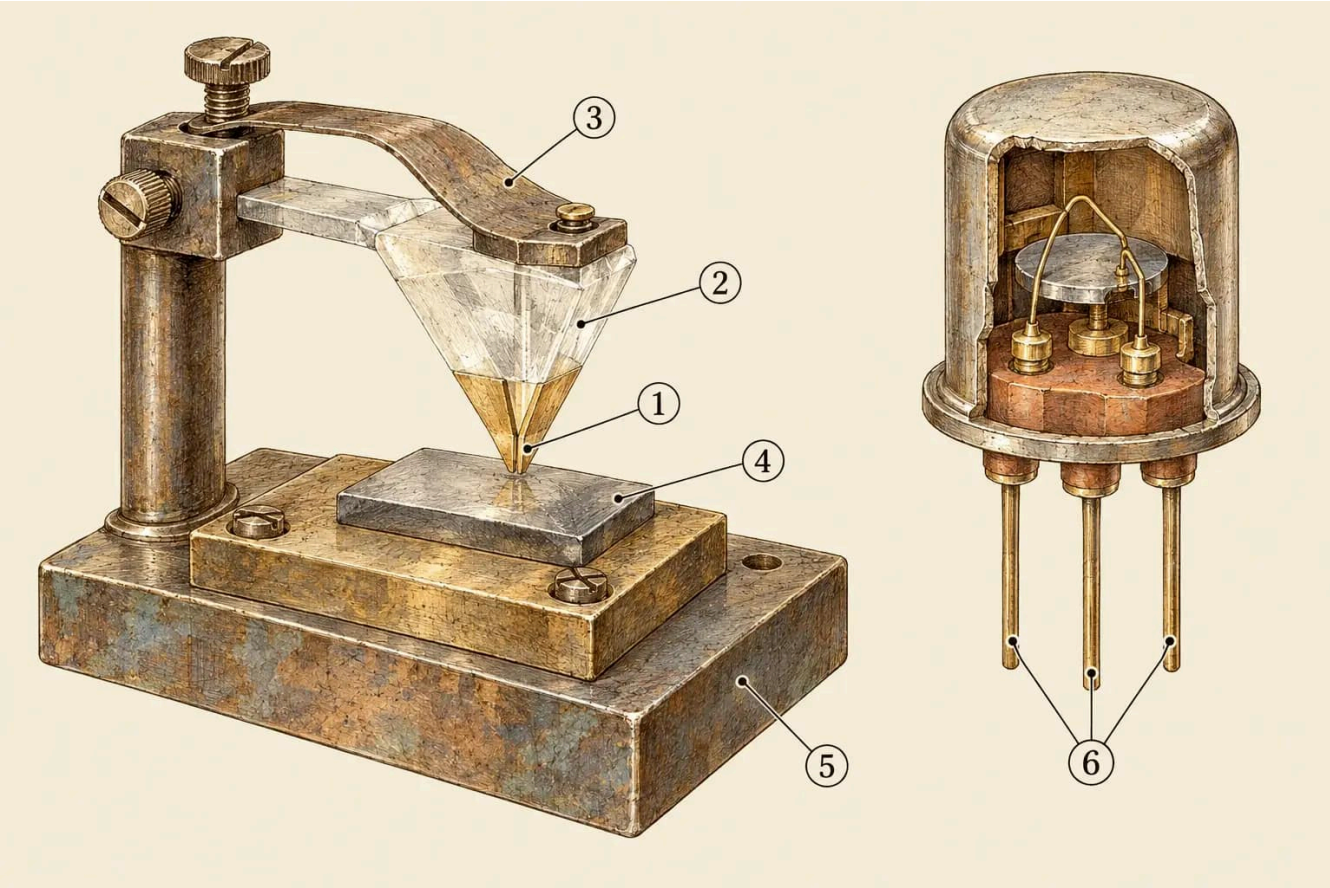
Transistor

Un interrupteur sans pièce mobile

1947 · Époque moderne · Âge électrique

Nécessite: Radio (p. 347)

Mène à: Ordinateur (p. 368), Cellule solaire (p. 372)



1 Contacts en feuille d'or 2 Coin en plastique 3 Ressort 4 Plaquette de germanium 5 Socle métallique 6 Fils d'un transistor à jonction

Un transistor est un petit morceau de semi-conducteur dans lequel un faible courant ou une faible tension commande un courant bien plus fort; il peut ainsi amplifier un signal ou servir d'interrupteur. John Bardeen et Walter Brattain ont fabriqué le premier aux Bell Labs en décembre 1947, et une puce en contient aujourd'hui des milliards.

Ce que c’est

Un transistor est une vanne à courant électrique sans pièce mobile. Un petit courant ou une petite tension appliqués sur une borne commandent un courant bien plus grand entre les deux autres. Polarisé par un courant ou une tension continus bien choisis, il restitue un signal faible avec une amplitude bien plus grande: c’est l’amplification, son rôle dans une radio ou un appareil auditif. Basculé entre l’état complètement passant et l’état bloqué, il sert d’interrupteur, et un ordinateur est fait de milliards de ces interrupteurs.

À gauche, la planche montre le tout premier transistor, le dispositif à pointes construit par Bardeen et Brattain en 1947 : une plaquette de germanium sur un socle métallique, contre laquelle un ressort appuie un coin en plastique. Une bande de feuille d'or passe sur la pointe du coin ; fendue au rasoir, elle forme deux contacts qui touchent le germanium à une fraction de millimètre l'un de l'autre. À droite, un transistor à jonction des années 1950 dans son petit boîtier métallique, avec ses trois fils.

Comment ça marche

Les transistors sont faits de semi-conducteurs comme le germanium ou le silicium. Un cristal pur de ces éléments conduit mal le courant. Une infime trace d'un autre élément, ajoutée lors du dopage, modifie fortement sa conductivité. Le phosphore ou l'arsenic apportent des électrons en surplus : on obtient un matériau de type n. Le bore ou le gallium laissent des lacunes, les « trous », qui se comportent comme des charges positives : c'est le type p.

À la rencontre d'une zone p et d'une zone n se forme une jonction qui ne laisse passer facilement le courant que dans un sens. Un transistor à jonction empile trois couches, n-p-n ou p-n-p, appelées émetteur, base et collecteur. La base est très mince. Dans un transistor n-p-n, un petit courant injecté dans la base laisse passer du collecteur à l'émetteur un courant beaucoup plus fort, souvent cent fois plus ou davantage. Dans un transistor p-n-p, tous les sens sont inversés.

Avant 1950, le tube électronique remplissait la même fonction, mais il lui fallait un filament chaud, une ampoule de verre et bien plus d'énergie.

La plupart des transistors fabriqués aujourd'hui sont des transistors à effet de champ (MOSFET). Une tension appliquée sur une grille, isolée du silicium par une fine couche d'oxyde, ouvre ou ferme un étroit canal conducteur juste en dessous. Il n'entre presque aucun courant dans la grille tant que son état ne change pas. Dans les circuits CMOS des puces, un transistor consomme surtout au moment où il commute, et c'est l'une des raisons qui permettent d'en loger des milliards sur une seule puce.

Comment le construire

Les transistors modernes sortent d'usines à silicium ultrapur et salles blanches valant des milliards. Ce qui suit retrace la fabrication des premiers, dans l'ordre qu'un atelier de reconstruction suivrait : d'abord un détecteur à pointe, puis un transistor à pointes, et seulement ensuite les jonctions. Ce n'est pas une recette ; pour voir un transistor fonctionner, mieux vaut en utiliser un du commerce dans un montage en basse tension.

Se procurer un cristal adapté. Les dispositifs à pointes demandent un morceau de germanium de type n assez pur. Dans les années 1940, il provenait des travaux de guerre sur les détecteurs de radar. La galène (sulfure de plomb), le cristal à « moustache de chat » des premiers postes de radio, ne donne qu'une diode de détection rudimentaire.

Préparer la surface. On la dresse à plat puis on la décape, car le comportement des contacts en dépend. Cette étape fait appel à des acides forts et relève d'un laboratoire correctement équipé.

Réaliser les contacts. Deux pointes métalliques fines, ou une feuille d'or fendue sur un coin en plastique comme en 1947, doivent toucher le cristal tout près l'une de l'autre. Un ressort les maintient sous une pression légère et constante. Le dessous du cristal est soudé à un bloc métallique qui forme la troisième borne.

Former et tester. Les premiers fabricants « formaient » le contact collecteur en y envoyant de brèves impulsions de courant, ce qui améliorait le gain, puis mesuraient chaque transistor. Beaucoup de dispositifs ne fonctionnaient pas ; seuls ceux qui réussissaient les essais étaient conservés.

Passer aux jonctions. Les transistors à jonctions tirées exigent des cristaux tirés d'un bain fondu avec un dopage contrôlé, donc un four régulé avec précision sous atmosphère inerte. Les transistors à jonctions alliées, fabriqués dès le début des années 1950, s'obtenaient autrement : on fondait de petites pastilles d'indium sur les deux faces d'une mince plaquette de germanium. Ce sont dans les deux cas des procédés industriels.

> **Sécurité.** Les acides de décapage brûlent la peau et les yeux ; l'acide fluorhydrique, employé pour décaper le silicium, peut empoisonner l'organisme à travers la peau, avec des symptômes retardés, même après une petite éclaboussure, et doit être laissé aux spécialistes. Il ne faut pas respirer les poussières de germanium ou de silicium. Le fer à souder brûle, et les anciennes soudures contiennent du plomb. Testez les montages en basse tension : le courant du secteur peut tuer.

Histoire et évolution

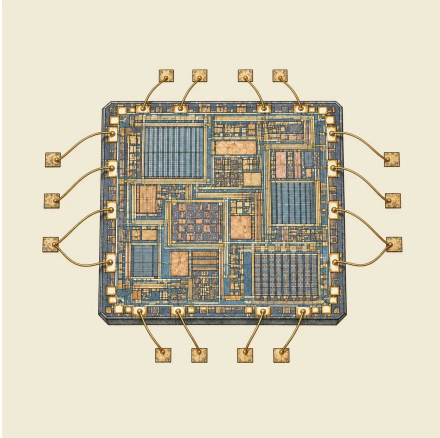
La Regency TR-1 de 1954 n'avait besoin que de quatre transistors.

Depuis les années 1920, les ingénieurs cherchaient à remplacer le tube à vide par un composant solide. Julius Lilienfeld dépose en 1925 un brevet de dispositif à effet de champ, mais aucun prototype fonctionnel n'est attesté. Après la Seconde Guerre mondiale, les Bell Labs créent un groupe de physique du solide dirigé par William Shockley pour trouver un amplificateur destiné au réseau téléphonique. Le dispositif à effet de champ de Shockley ne marche pas. John Bardeen attribue l'échec à des électrons piégés à la surface du cristal ; avec Walter Brattain, il essaie alors de faire passer le courant par des contacts ponctuels.

Le 16 décembre 1947, leur montage amplifie un signal. Une semaine plus tard, ils le présentent à la direction des Bell Labs. L'entreprise annonce l'invention à New York le 30 juin 1948, et l'ingénieur John Pierce invente le mot « transistor ». La même année à Paris, Herbert Mataré et Heinrich Welker mettent au point de leur côté un dispositif semblable, qu'ils baptisent « transistron ».

Les transistors à pointes étaient fragiles. En janvier 1948, Shockley conçoit le transistor à jonction, que les Bell Labs savent produire à partir de 1951. La radio de poche Regency TR-1, sortie en 1954, utilise quatre transistors au germanium de Texas Instruments et se vend à plus de 100 000 exemplaires. Le silicium, qui supporte mieux la chaleur, remplace ensuite le germanium.

En 1958, Jack Kilby, chez Texas Instruments, réalise le premier circuit intégré sur un petit barreau de germanium. Mohamed Atalla et Dawon Kahng font la démonstration du transistor MOS aux Bell Labs en 1960. Bardeen, Brattain et Shockley partagent le prix Nobel de physique en 1956. Depuis, les transistors n'ont cessé de rapetisser, et le transistor MOS est aujourd'hui l'objet manufacturé produit en plus grand nombre.



Un circuit intégré réunit de nombreux transistors et leurs connexions sur un seul morceau de silicium.

Chiffres clés

Premier dispositif fonctionnel
16 décembre 1947, Bell Labs, New Jersey

Dépôt du brevet de Bardeen et Brattain
17 juin 1948 (US 2,524,035)

Annonce publique
30 juin 1948, New York

Prix Nobel de physique
1956, Bardeen, Brattain et Shockley

Transistors fabriqués à ce jour
Environ 13×10^{21}, dont 99,9 % de MOS (estimation de l'analyste Jim Handy)

Sources

1. 1947: Invention of the point-contact transistor · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-point-contact-transistor/
2. 1948: Conception of the junction transistor · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/conception-of-the-junction-transistor/
3. Milestones: First semiconductor integrated circuit (IC), 1958 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Semiconductor_Integrated_Circuit_(IC),_1958
4. 13 sextillion and counting: the long and winding road to the most frequently manufactured human artifact in history · Computer History Museum https://computerhistory.org/blog/13-sextillion-counting-the-long-winding-road-to-the-most-frequently-manufactured-human-artifact-in-history/
5. Regency TR-1 · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Regency_TR-1
6. Transistor · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor
7. The Transistor, A Semi-Conductor Triode (Bardeen and Brattain, Physical Review 74, 230) · American Physical Society https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.230
8. Some Circuit Aspects of the Transistor (Ryder and Kircher, Bell System Technical Journal 28, 367) · Bell Telephone Laboratories https://archive.org/details/bstj28-3-367
9. The Surface State Job · Computer History Museum https://computerhistory.org/blog/the-surface-state-job/

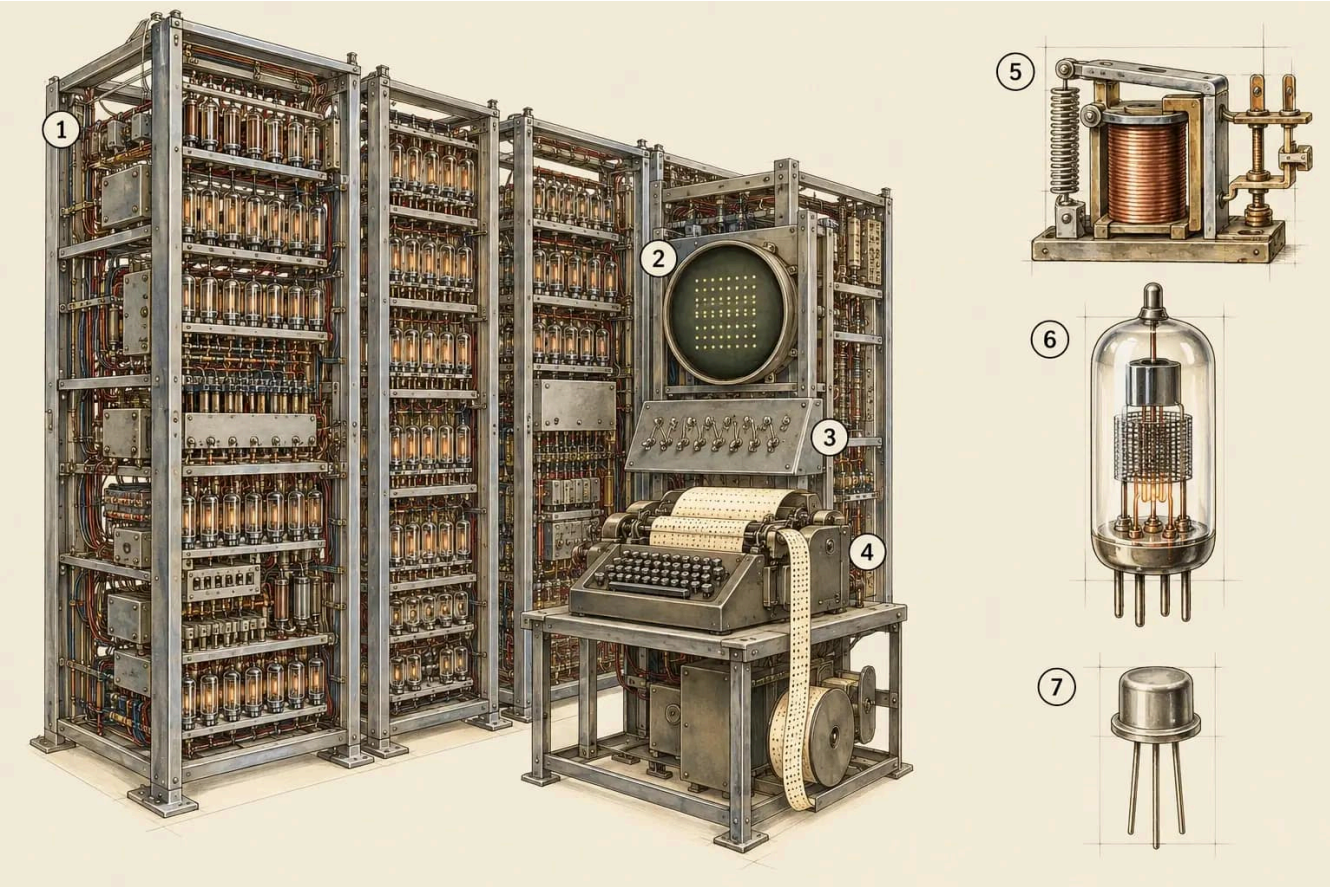
Faits vérifiés le 2026-10-11

Ordinateur

La machine à programme enregistré

1948 · Époque moderne · Âge électrique

Nécessite: Transistor (p. 364), Numération de position (p. 99)



1 Baies de tubes à vide 2 Tube mémoire cathodique: un point par bit 3 Panneau d'interrupteurs pour entrer les données 4 Téléimprimeur et ruban perforé 5 Relais: un interrupteur mû par un électroaimant 6 Tube à vide: sa grille commande le courant 7 Transistor: l'interrupteur à semi-conducteur

Un ordinateur est une machine à calculer programmable; le modèle actuel range son programme dans sa propre mémoire et calcule en binaire avec des interrupteurs ouverts ou fermés. Le premier à exécuter un programme depuis une mémoire électronique fut le « Baby » de Manchester, le 21 juin 1948, et téléphones et portables suivent encore son plan.

Ce que c'est

Un ordinateur exécute un programme, une liste d'instructions, sur des données. Dans l'architecture à programme enregistré décrite ici, le programme loge dans la même mémoire que les nombres qu'il traite: la machine peut donc en charger un nouveau, le modifier ou en écrire un autre sans être reconstruite. Cette idée la distingue des machines programmables antérieures, qui prenaient leurs instructions sur ruban, cartes, fiches ou interrupteurs.

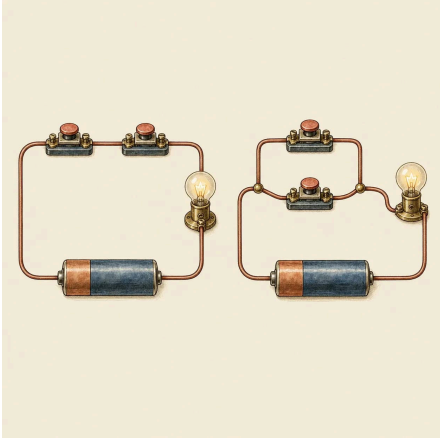
Les ordinateurs actuels travaillent en binaire, avec les seuls chiffres 0 et 1, parce que deux états sont faciles à rendre fiables: un interrupteur est ouvert ou fermé. L'ENIAC et quelques autres machines anciennes comptaient

encore en décimal. Pour une société qui reconstruit ses outils, il calcule, pilote des machines comme les pompes ou les réseaux électriques, et achemine des messages.

Comment ça marche

Les nombres binaires. Le binaire est une numération de position comme nos chiffres décimaux, mais chaque rang vaut le double de celui de droite : 1, 2, 4, 8, 16. Treize vaut 8 + 4 + 1 et s'écrit 1101. Huit chiffres binaires, ou bits, couvrent tous les entiers de 0 à 255.

Les portes logiques. Deux interrupteurs en série n'allument une lampe que s'ils sont fermés tous les deux : c'est une porte ET. En parallèle, l'un ou l'autre suffit : une porte OU. Un relais dont le contact s'ouvre quand sa bobine est alimentée forme une porte NON, qui change 1 en 0. Le relais obéit à un électroaimant, le tube à vide à la tension de sa grille, le transistor au signal de sa base ou de sa grille. ET, OU et NON suffisent à exprimer n'importe quelle règle reliant des bits d'entrée à des bits de sortie.



En série, l'ampoule ne s'allume que si l'on presse les deux boutons ; en parallèle, un seul suffit.

Additionner avec des portes. En binaire, 1 + 1 donne 10 : somme 0, retenue 1. Le bit de somme vaut 1 quand une seule des entrées vaut 1, une règle appelée OU exclusif (XOR) ; la retenue ne vaut 1 que si les deux valent 1, ce qui est un ET. Ensemble, elles forment un demi-additionneur. Un additionneur complet reçoit en plus la retenue de la colonne de droite, et huit à la file additionnent deux nombres de 8 bits, colonne par colonne, comme un écolier sur son cahier.

La mémoire. Deux portes NON-OU (un OU suivi d'un NON), dont chaque sortie alimente une entrée de l'autre, forment une bascule : une impulsion sur l'une des entrées libres la met à 1, une impulsion sur l'autre la remet à 0, et elle garde ce bit tant que le courant passe. Manchester stockait ses bits en points chargés sur un tube cathodique, l'EDSAC en impulsions sonores dans des tubes de mercure. Chaque mot, un groupe de bits, porte un numéro, son adresse.

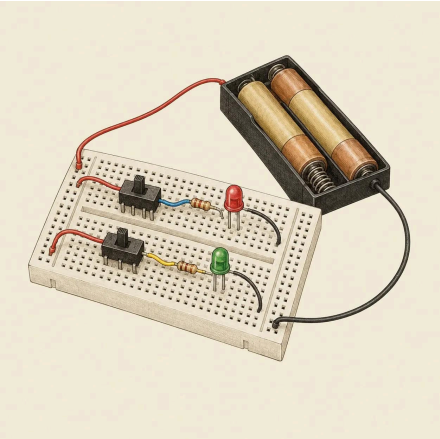
Le cycle. Un registre, le compteur ordinal, contient l'adresse de la prochaine instruction. Le processeur va la chercher, la décode, l'exécute, puis recommence. Une instruction peut ajouter un nombre de la mémoire à l'accumulateur, ranger un résultat, ou sauter ailleurs si une valeur est négative ; ce saut conditionnel permet au programme de boucler et de choisir. Claviers et capteurs font entrer les données ; écrans, imprimantes et moteurs font sortir les résultats.

Comment le construire

Un processeur moderne exige une usine de puces, mais sa logique s'apprend sur une table.

Réunir le matériel. Une plaque d'essai sans soudure, deux ou trois piles AA en boîtier (3 à 4,5 V) ou une alimentation USB de 5 V, deux inverseurs bipolaires, deux LED, deux résistances de 330 à 470 ohms et du fil. Chaque LED se monte patte longue (anode) côté inverseur et patte courte (cathode) au 0 V. Écrivez d'abord la table de vérité : pour les entrées A B = 00, 01, 10, 11, la somme vaut 0, 1, 1, 0 et la retenue 0, 0, 0, 1.

Câbler la retenue. Amenez l'alimentation au commun du premier pôle de A, son contact « marche » au commun du premier pôle de B, et ce contact « marche » à une LED par une résistance ; l'autre patte de la LED retourne au 0 V. Elle ne s'allume que pour 11 : c'est un ET.



Essayez d'abord chaque interrupteur avec sa LED; une LED a toujours besoin d'une résistance en série.

Câbler la somme. Sur les seconds pôles, reliez le contact « marche » de A au contact « arrêt » de B, et le contact « arrêt » de A au contact « marche » de B. Alimentez le commun de A et menez le commun de B à la seconde LED par une résistance, cathode au 0 V. Elle s'allume quand les inverseurs diffèrent : c'est le XOR. Vérifiez les quatre cas sur la table.

Enchaîner un additionneur plus grand. Un additionneur complet, ce sont deux demi-additionneurs et une porte OU qui réunit leurs retenues. À ce stade, les circuits logiques sont plus commodes : un additionneur de 4 bits demande deux 74HC86 (XOR), deux 74HC08 (ET) et un 74HC32 (OU). Alimentez-les comme l'indique la fiche technique (broche 14 au plus, broche 7 au 0 V, un condensateur de 100 nF entre les deux). Chaque retenue sortante entre dans la colonne suivante et la première retenue entrante va au 0 V ; chaque entrée d'inverseur reçoit une résistance de 10 kilohms vers le 0 V, et chaque LED de sortie une résistance de 1 kilohm.

Faire tourner un ordinateur sur papier. Dessinez huit cases mémoire numérotées, un accumulateur et un compteur ordinal à 0. Écrivez CHARGE 5 dans la case 0, AJOUTE 6 dans la case 1, RANGE 7 dans la case 2, STOP dans la case 3, puis 3 dans la case 5 et 4 dans la case 6. Jouez le processeur : lisez la case que désigne le compteur, exécutez-la, ajoutez un au compteur. La case 7 finit par contenir 7. Codez ensuite chaque instruction sur deux chiffres, l'opération puis l'adresse, avec CHARGE 1, AJOUTE 2, RANGE 3 et STOP 0 : le programme devient 15, 26, 37, 00, des nombres parmi les données.

> **Sécurité.** Piles ou alimentation USB de 5 V seulement, jamais le secteur. Chaque LED a besoin de sa résistance. Une pile ou une batterie externe en court-circuit peut chauffer ses fils au point de brûler. Débranchez l'alimentation avant de recâbler. Une sortie de circuit intégré ne peut pas alimenter la bobine d'un relais : commandez-la par un transistor dimensionné pour son courant, avec une diode à ses bornes, côté marqué d'un anneau (la cathode) vers le plus, pour absorber la surtension à la coupure.

Histoire et évolution

La machine analytique de Charles Babbage, conçue en 1834, comptait un magasin, un moulin pour le calcul et un programme sur cartes perforées ; elle ne fut jamais construite. Ada Lovelace publia en 1843 une suite d'opérations pour elle. Les tabulatrices électriques à cartes de Herman Hollerith dépouillèrent le recensement américain de 1890.

En 1936, Alan Turing décrivit une machine universelle qui lit ses instructions sur le même ruban que ses données. Konrad Zuse présenta à Berlin son Z3 à relais le 12 mai 1941. Dès février 1944, le Colossus électronique de Tommy Flowers aida à casser le chiffre allemand Lorenz à Bletchley Park ; il resta secret jusqu'aux années 1970. L'ENIAC de J. Presper Eckert et John Mauchly, à Philadelphie, annoncé en 1946, était universel mais se programmait en déplaçant des câbles. Chacun peut se dire le premier, selon qu'on exige l'électronique, l'universalité ou le programme enregistré.

Croquis simplifié de la partie de sa première machine à différences, un septième, que Babbage fit assembler en 1832; elle fonctionne toujours.

Le rapport de John von Neumann sur l'EDVAC, en 1945, issu d'échanges avec Eckert, Mauchly et d'autres, décrivait une machine gardant programme et données dans une seule mémoire. La première à fonctionner fut le « Baby » de Manchester, de Frederic Williams, Tom Kilburn et Geoff Tootill, le 21 juin 1948. L'EDSAC de Maurice Wilkes, à Cambridge, suivit le 6 mai 1949 et servit bientôt des utilisateurs.

Manchester fit tourner un ordinateur à transistors en novembre 1953. Les circuits intégrés, réalisés pour la première fois en 1958, entrèrent dans les ordinateurs dans les années 1960, et en 1971 le 4004 d'Intel mit tout un processeur sur une seule puce.

Chiffres clés

Zuse Z3, à relais, programme sur film perforé
Présenté à Berlin le 12 mai 1941

Colossus, électronique, réglé par fiches et interrupteurs
En service à Bletchley Park dès février 1944 ; environ 1 600 tubes, 2 400 à 2 500 sur les modèles suivants

ENIAC
Annoncé en février 1946 ; environ 18 000 tubes à vide, 30 tonnes courtes américaines (environ 27 t), 150 kW

Premier programme enregistré exécuté
21 juin 1948, Manchester : 17 instructions, mémoire de 32 mots de 32 bits

Intel 4004, premier microprocesseur commercial
1971, environ 2 300 transistors sur une puce

Sources

1. Timeline of Computer History: Computers · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/timeline/computers/
2. The Modern History of Computing (B. Jack Copeland) · Stanford Encyclopedia of Philosophy https://plato.stanford.edu/entries/computing-history/
3. Mark 1 Story: The Baby · University of Manchester, Department of Computer Science https://www.curation.cs.manchester.ac.uk/computer50/www.computer50.org/mark1/new.baby.html
4. Milestones: Manchester University "Baby" Computer and its Derivatives, 1948–1951 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Manchester_University_%22Baby%22_Computer_and_its_Derivatives,_1948-1951
5. Colossus · The National Museum of Computing https://www.tnmoc.org/colossus
6. ENIAC · Penn Engineering, University of Pennsylvania https://www.engineering.upenn.edu/about/history-heritage/eniac/
7. A brief informal history of the Computer Laboratory · University of Cambridge Computer Laboratory https://www.cl.cam.ac.uk/events/EDSAC99/history.html
8. The Engines · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/babbage/engines/
9. Ada Lovelace · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/babbage/adalovelace/
10. Tabulation and Processing · U.S. Census Bureau https://www.census.gov/about/history/bureau-history/census-innovations/technology/tabulation-and-processing.html
11. Milestones: First Semiconductor Integrated Circuit (IC), 1958 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Semiconductor_Integrated_Circuit_(IC),_1958
12. 1971: Microprocessor integrates CPU function onto a single chip · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/microprocessor-integrates-cpu-function-onto-a-single-chip/
13. 74HC86; 74HCT86 Quad 2-input EXCLUSIVE-OR gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT86.pdf
14. 74HC08; 74HCT08 Quad 2-input AND gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT08.pdf
15. 74HC32; 74HCT32 Quad 2-input OR gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT32.pdf
16. SN74HC86 Quadruple 2-Input Exclusive-OR Gates (data sheet) · Texas Instruments https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc86.pdf
17. Full Adder · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/Electronic/fulladd.html
18. Binary Adder and Binary Addition · Electronics Tutorials https://www.electronics-tutorials.ws/combination/comb_7.html

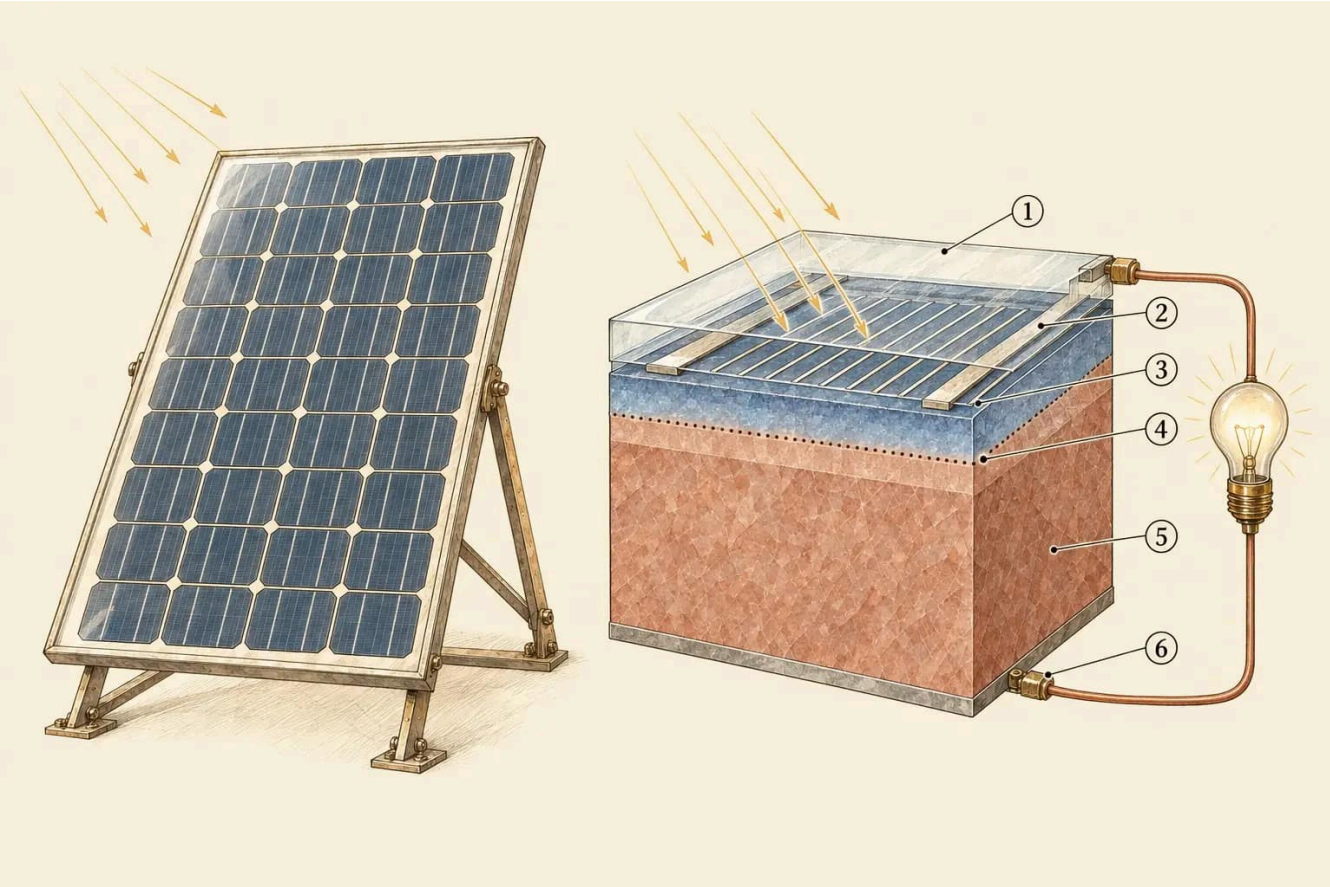
Faits vérifiés le 2026-10-14

Cellule solaire

La lumière changée en courant

1954 · Époque moderne · Âge électrique

Nécessite: Transistor (p. 364), Pile électrique (p. 242), Verre (p. 134)



1 Plaque de verre 2 Grille de contact avant 3 Couche mince de type n (phosphore) 4 Jonction p–n 5 Base de type p (bore) 6 Contact arrière

Une cellule solaire est une fine tranche de semi-conducteur où la lumière libère des électrons, qu'un champ électrique interne pousse vers les contacts pour former un courant, sans pièce mobile ni combustible. Les Bell Labs ont présenté la première cellule au silicium utilisable en 1954, et l'énergie solaire a fourni 8,7% de l'électricité mondiale en 2025.

Ce que c'est

Une cellule solaire transforme directement la lumière en courant électrique, sans pièce mobile ni combustible. La plupart sont des tranches carrées de silicium un peu plus larges qu'une main. Chacune donne environ un demi-volt au soleil: on en relie donc des dizaines sous une vitre pour faire un panneau, comme celui de 36 cellules représenté sur la planche.

La date retenue est avril 1954: les Bell Labs présentent alors une cellule au silicium qui convertit environ 6% de la lumière solaire en électricité, assez pour alimenter de vrais appareils. Becquerel avait vu la lumière produire un courant dès 1839, mais les cellules au sélénium fabriquées à partir de 1883 restaient sous 1%.

Comment ça marche

Le silicium pur conduit mal le courant. Le dopage au phosphore, à l'état de traces, lui apporte des électrons en surplus (type n) ; une trace de bore crée au contraire des manques, appelés trous, qui se comportent comme des charges positives (type p). Une cellule classique part d'une plaquette dopée au bore dont on imprègne la face avant de phosphore, sur moins d'un millième de millimètre. Là où les deux zones se touchent, électrons et trous se neutralisent sur une bande étroite. Il y reste des charges fixes qui maintiennent un champ électrique permanent à travers cette jonction p–n.

Les cellules sont sciées dans un monocristal de silicium tiré d'un bain fondu ; une plaquette mesure aujourd'hui environ 0,14 mm d'épaisseur.

Un photon assez énergique arrache un électron à sa liaison dans le cristal et laisse un trou à sa place. Près de la jonction, le champ envoie l'électron côté n et le trou côté p. Les électrons se rassemblent dans les doigts avant, parcourent le circuit extérieur, où ils allument une lampe ou chargent une batterie, puis reviennent par le contact arrière.

À vide, une cellule affiche environ 0,6 à 0,7 V, et environ 0,5 V quand elle débite. Cette tension varie peu avec l'éclairement, alors que le courant le suit : deux fois moins de lumière, à peu près deux fois moins de courant. En série, les tensions s'additionnent ; 36 cellules travaillent ainsi vers 17 V, de quoi charger une batterie de 12 V. En parallèle, ce sont les courants qui s'ajoutent. Une seule cellule à l'ombre freine toute sa chaîne, d'où les diodes de dérivation logées dans les panneaux.

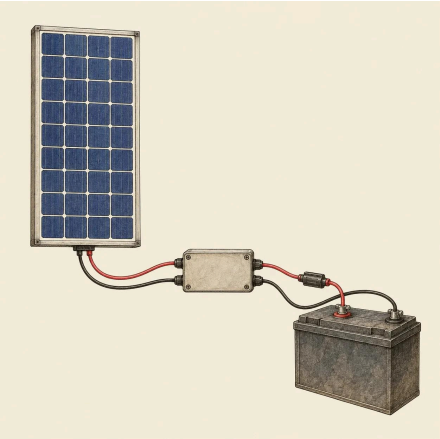
Le silicium laisse passer sans s'en servir l'infrarouge au-delà d'environ 1,1 micromètre, et les photons trop énergiques perdent leur surplus en chaleur. En 1961, William Shockley et Hans-Joachim Queisser ont montré que ces pertes limitent une cellule à une seule jonction à environ un tiers de la lumière solaire. Le silicium subit en plus des pertes propres au cristal, qui ramènent sa limite à environ 29 % ; la meilleure cellule de laboratoire atteignait 28,1 % en 2026. La chaleur réduit aussi la production : une cellule au silicium classique perd environ 0,4 à 0,5 % de sa puissance par degré Celsius, surtout par baisse de tension.

Comment s'y prendre

Fabriquer des cellules relève de l'usine. Une petite installation de 12 V faite de panneaux achetés, avec des éléments compatibles et en suivant les notices des fabricants, reste en revanche à la portée d'un amateur soigneux.

Dimensionner le panneau. Quatre lampes LED de 5 W allumées 4 heures et une radio de 10 W pendant 2 heures consomment 100 wattheures (Wh) par jour. Un panneau fournit à peu près sa puissance nominale × le nombre d'heures d'ensoleillement maximal (l'énergie solaire du jour comptée en heures de plein soleil, au mois le plus sombre) × 0,7 pour la chaleur, la poussière et les câbles. Un panneau de 100 W avec 3 heures d'ensoleillement maximal donne environ 210 Wh : la marge est confortable.

Choisir la batterie. Prévoyez de un à trois jours couverts. Une batterie au plomb vit plus longtemps si on la vide rarement au-delà de la moitié. Une batterie lithium-fer-phosphate peut être utilisée presque entièrement, mais seulement avec son électronique de gestion et un régulateur réglé pour le lithium ; la plupart ne doivent pas être chargées sous 0 °C. Deux jours à 100 Wh, tirés d'une batterie au plomb de 12 V utilisée à moitié, demandent au moins 33 Ah : prenez 40 Ah.



Panneau, régulateur et batterie, avec le fusible sur le câble positif, contre la batterie.

Poser un régulateur de charge. Ne branchez jamais un panneau directement sur une batterie. Le régulateur dose la charge pour que la batterie ne soit jamais surchargée, puis la maintient pleine, et les appareils branchés sur sa sortie « utilisation » sont coupés avant qu'elle soit vide. Un régulateur simple, de type PWM, doit supporter au moins 1,25 fois le courant de court-circuit du panneau. Pour un modèle MPPT, comparez ses limites de tension, de courant et de puissance avec la fiche technique du panneau, en sachant que la tension à vide augmente par temps froid.

Fusible et câbles. Placez un fusible prévu pour le courant continu sur le câble positif, tout contre la batterie. Son calibre doit être inférieur à ce que supporte le câble et supérieur au plus fort courant normal, et il doit pouvoir couper le courant très élevé qu'une batterie débite dans un court-circuit. À 10 A, un panneau situé à 5 m (10 m de cuivre) perd environ 0,3 V dans un câble d'extérieur de 6 mm² ; un fil plus fin perd davantage.

Installer et entretenir. Orientez le panneau vers l'équateur, sans ombre au milieu de la journée, incliné à peu près à la latitude du lieu pour un usage toute l'année. Rincez la poussière à l'eau avec une brosse douce. Un onduleur peut convertir les 12 V en tension du secteur, aussi dangereuse que celle du réseau.

Mesurer une cellule. Au soleil, lisez la tension d'une petite cellule sur la position volts continus d'un multimètre. Passez ensuite en ampères continus, mettez le fil rouge dans la borne 10 A et touchez les bornes de la cellule : vous lisez son courant de court-circuit. Vérifiez d'abord que le courant indiqué sur la cellule reste très en dessous de la limite de 10 A du multimètre, et ne laissez les pointes que quelques secondes. À l'ombre, la tension bouge à peine, le courant chute. Remettez ensuite le fil rouge dans la borne des volts, et ne mesurez jamais ainsi le courant d'une batterie.

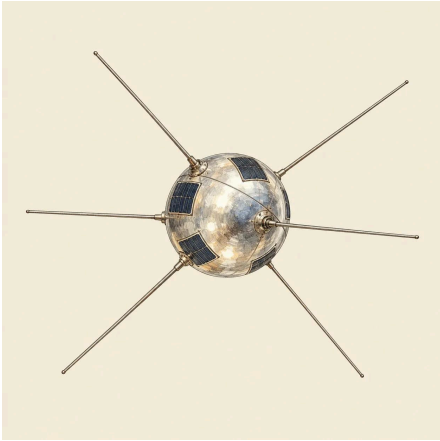
> **Sécurité.** Un panneau produit une tension dès que la lumière l'atteint : couvrez-le pendant le câblage. Le courant continu peut entretenir un arc quand on débranche un connecteur en charge ; pour intervenir, couvrez le panneau, débranchez d'abord le panneau, la batterie en dernier, et rebranchez dans l'ordre inverse. Un court-circuit aux bornes d'une batterie fait fondre les outils et provoque des incendies, et le fusible n'empêche pas une clé posée en travers des deux bornes : outils isolés et cache-bornes. En charge, les batteries au plomb dégagent de l'hydrogène : aérez, pas d'étincelles, lunettes de protection. Sur un toit, harnais et point d'ancrage, ou faites appel à des professionnels. Tout ce qui touche au secteur, onduleurs compris, est l'affaire d'un électricien qualifié.

Histoire et évolution

En 1839, Edmond Becquerel, 19 ans, éclaire des électrodes recouvertes de chlorure d'argent plongées dans un acide et mesure un faible courant. En 1873, l'ingénieur anglais Willoughby Smith, qui teste des câbles télégraphiques sous-marins, remarque que le sélénium conduit mieux à la lumière ; en 1883, l'Américain Charles Fritts fabrique des cellules de sélénium sous une feuille d'or assez fine pour laisser passer le jour. En 1905, Albert Einstein explique que la lumière arrive par paquets dont l'énergie dépend de la couleur.

En 1940, Russell Ohl, aux Bell Labs, constate qu'un échantillon de silicium chargé de phosphore d'un côté et de bore de l'autre produit un courant à la lumière : c'est la première jonction p–n, avec un rendement d'environ 1 %. En 1953, son collègue Daryl Chapin cherche à alimenter du matériel téléphonique isolé et n'obtient que 0,5 % avec le sélénium. Le silicium dopé de Calvin Fuller et Gerald Pearson fait bien mieux, et la cellule présentée le 25 avril 1954 fait tourner une grande roue miniature.

Les premières cellules au silicium coûtent bien trop cher pour un usage courant, et leur premier client régulier est l’espace. Vanguard 1, lancé en mars 1958, porte six petits panneaux de 18 cellules chacun : son émetteur sur piles se tait en juin 1958, celui alimenté par le soleil émet jusqu’en mai 1964. Avec la croissance des usines, le prix des modules tombe d’environ 132 dollars par watt en 1975 à 0,27 dollar en 2024 (en dollars de 2025). La plupart des cellules partent aujourd’hui de plaquettes dopées au phosphore, avec le bore en face avant. En 2025, les panneaux solaires ont produit 8,7 % de l’électricité mondiale, selon Ember (avril 2026).



Vanguard 1, 1958 : six petits panneaux de cellules solaires sur une sphère d’environ 16 cm de diamètre.

Chiffres clés

Première cellule utilisable

Présentée par les Bell Labs le 25 avril 1954, rendement d'environ 6 %

Rendement aujourd'hui

28,1 % pour la meilleure cellule de laboratoire au silicium ; un peu moins de 25 % pour les meilleurs modules du commerce (Fraunhofer ISE, juillet 2026)

Part de l'électricité mondiale

8,7 % en 2025, contre 1,1 % en 2015 (Ember, avril 2026)

Tension d'une cellule au silicium

Environ 0,6 à 0,7 V à vide, environ 0,5 V en fonctionnement

Effet de la chaleur

Environ 0,4 à 0,5 % de puissance en moins par °C pour une cellule au silicium classique ; la fiche technique de chaque panneau donne sa valeur

Sources

1. April 25, 1954: Bell Labs demonstrates the first practical silicon solar cell · American Physical Society, APS News https://aps.org/apsnews/2009/04/bell-labs-silicon-solar-cell
2. Milestones: First practical photovoltaic solar cell · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Practical_Photovoltaic_Solar_Cell
3. 1940: Discovery of the p-n junction · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/discovery-of-the-p-n-junction/
4. First photovoltaic devices · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://pveducation.org/es/fotovoltaica/first-photovoltaic-devices
5. Open-circuit voltage · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage
6. Effect of light intensity · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity
7. Effect of temperature · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature
8. Limiting efficiency of crystalline silicon solar cells due to Coulomb-enhanced Auger recombination (Kerr, Cuevas, Campbell, 2003) · Australian National University https://researchportalplus.anu.edu.au/en/publications/limiting-efficiency-of-crystalline-silicon-solar-cells-due-to-cou/
9. Einstein and the photoelectric effect · American Physical Society, APS News https://www.aps.org/apsnews/2005/01/einstein-photoelectric-effect
10. Vanguard 1 · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/vanguard-1/
11. Vanguard 1 celebrates 50 years in Earth's orbit (Spaceport News, 21 March 2008, p. 7) · NASA Kennedy Space Center https://www3.nasa.gov/centers/kennedy/pdf/218158main_mar21color.pdf
12. Solar cell array design handbook, vol. 1 (JPL SP 43-38, 1976) · NASA / Jet Propulsion Laboratory https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770007250/downloads/19770007250.pdf
13. Photovoltaics Report (14 July 2026) · Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE https://ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html
14. Solar PV module prices, 1975–2024 · Our World in Data https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices
15. Global Electricity Review 2026: electricity demand and supply trends · Ember https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2026/electricity-demand-and-supply-trends/
16. Solar electric system design, operation and installation (C. Roos, 2009) · Washington State University Extension Energy Program https://digitalarchives.wa.gov/do/046161B1997D0FFD8FA86C78CAFFAB5C.pdf
17. SmartSolar MPPT 100/30 and 100/50 manual: operation · Victron Energy https://www.victronenergy.com/media/pg/Manual_SmartSolar_MPPT_100-30__100-50/en/operation.html
18. Series resistance · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance
19. Shunt resistance · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance
20. Single diode equivalent circuit models · Sandia National Laboratories, PV Performance Modeling Collaborative https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/single-diode-equivalent-circuit-models/
21. Production of upgraded metallurgical grade (UMG) silicon for a low-cost high-efficiency and reliable PV technology (Míguez Novoa et al., Frontiers in Photonics, 2024) · arXiv https://arxiv.org/abs/2604.04095

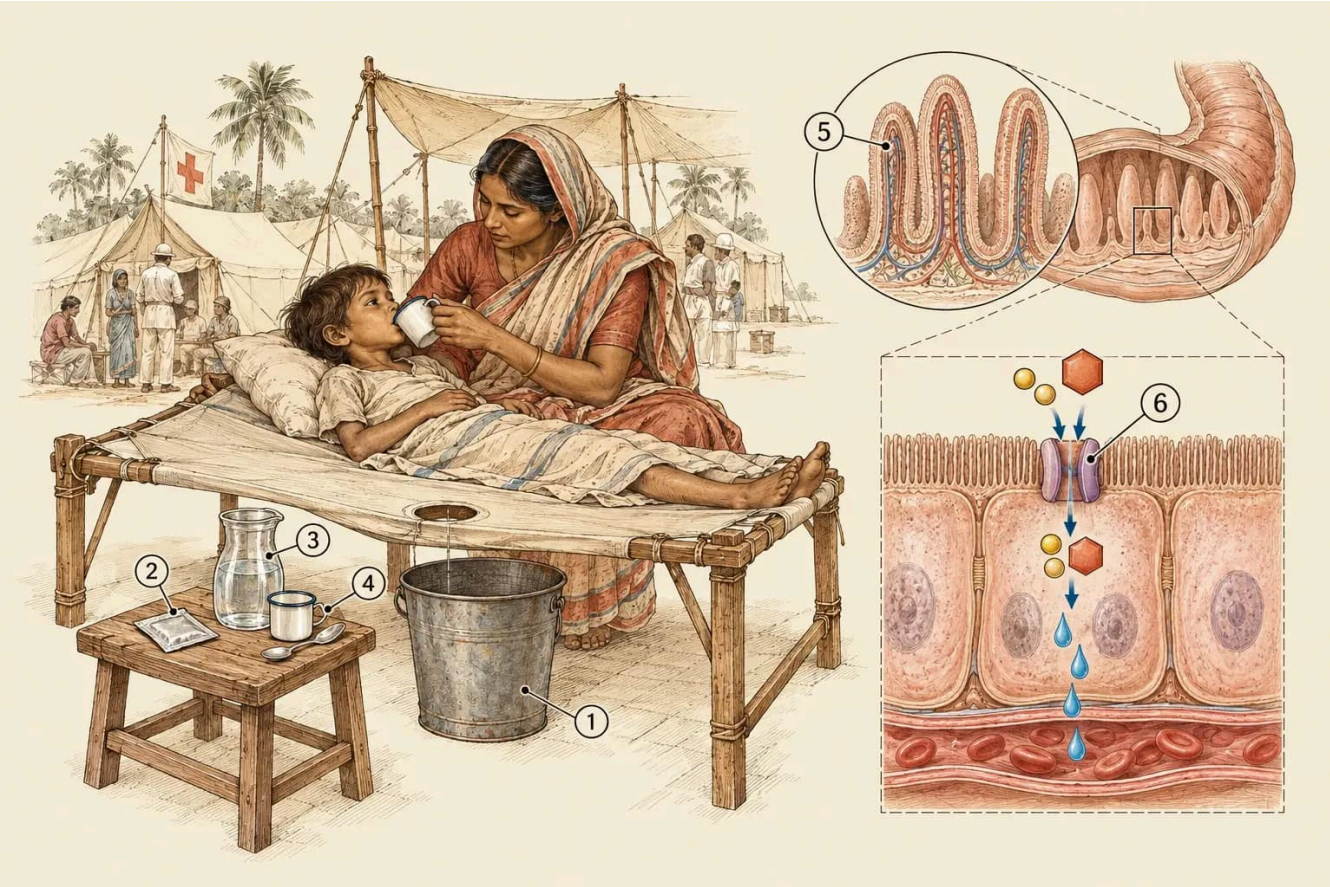
Faits vérifiés le 2026-10-14

Réhydratation orale

Sel, sucre et eau contre le choléra

1968 · Époque moderne · Âge électrique

Nécessite: Eau potable (p. 35), Mesures et étalons (p. 129)



1 Lit à choléra et son seau 2 Sachet de sels de réhydratation orale 3 Carafe d'eau potable 4 Tasse et cuillère
5 Villosités de l'intestin grêle 6 Transporteur sodium–glucose d'une cellule de la paroi

La réhydratation orale compense l'eau et les sels perdus dans la diarrhée par une boisson d'eau propre, de sels et de glucose dans des proportions fixes, que l'intestin continue d'absorber même pendant un choléra. Validée par des essais à Dacca et à Calcutta en 1968 et conditionnée en sachets standard depuis les années 1970, elle aurait sauvé des dizaines de millions d'enfants.

Ce que c'est

La diarrhée tue en asséchant le corps. Dans le choléra, une toxine fait déverser par la paroi de l'intestin grêle de l'eau et des sels dans le tube digestif, et un adulte peut perdre des litres de selles liquides en quelques heures. Le volume du sang chute, les reins lâchent et, sans traitement, la mort peut survenir dans la journée. Chez l'enfant, la plupart des diarrhées sont moins violentes, dues à des virus ou à d'autres bactéries, mais elles en tuent encore des centaines de milliers chaque année.

La réhydratation orale compense ces pertes par la bouche. Le malade boit une solution d'eau propre, de sel de cuisine, de glucose, de potassium et de citrate, préparée à partir d'un sachet de sels de réhydratation orale (SRO).

Elle n’arrête pas la diarrhée ; elle maintient le malade en vie pendant que le corps se débarrasse de l’infection.

La planche montre un camp de traitement du choléra au Bengale au début des années 1970. Un enfant est couché sur un lit à choléra, dont le trou et le seau permettent aux infirmières de mesurer chaque perte, pendant que sa mère lui donne à boire à la tasse. À droite, une coupe de la paroi intestinale montre pourquoi le traitement fonctionne.

Comment ça marche

L’intestin grêle est tapissé de villosités, de minuscules replis en forme de doigts couverts d’une seule couche de cellules. Chacune porte dans sa membrane externe une protéine qui fait entrer ensemble le sodium et le glucose : deux ions sodium pour une molécule de glucose. Robert Crane a proposé ce couplage à Prague en 1960, et des expériences sur l’intestin de lapin ont confirmé en 1964 que le sucre entraîne l’absorption du sodium. Le chlorure suit le sodium, et l’eau suit les sels et le sucre dissous.

La toxine du choléra provoque la sécrétion mais laisse ce transporteur fonctionner. Une boisson qui contient à la fois du sodium et du glucose est donc absorbée alors même que l’intestin perd du liquide, et en quantité suffisante elle compense les pertes.

L’eau seule n’apporte pas de sel et ne peut donc pas compenser à elle seule les pertes ; bue en grande quantité, elle dilue le sodium qui reste dans le sang. Les boissons sucrées comme les sodas ou les jus de fruits ont trop de sucre et trop peu de sel. Le sucre en excès reste dans l’intestin et y attire de l’eau, ce qui aggrave la diarrhée. La formule à osmolarité réduite, recommandée par l’OMS au début des années 2000, contient moins de sodium et de glucose que la première solution. Chez l’enfant atteint d’une diarrhée autre que le choléra, elle a réduit le volume des selles d’un cinquième à un quart selon les études, et les perfusions imprévues d’environ un tiers.

Comment on la produit et l’utilise

Cette section décrit comment les systèmes de santé fournissent les SRO et en enseignent l’usage. Ce n’est pas une recette à faire chez soi.

Des sachets industriels. Des usines pharmaceutiques mélangent du glucose purifié, du chlorure de sodium, du chlorure de potassium et du citrate trisodique selon la formule de l’OMS, puis scellent la poudre sèche dans une feuille étanche à l’humidité, chaque sachet étant prévu pour un volume d’eau précis. En 2024, l’UNICEF a livré à elle seule 29,2 millions de sachets dans 56 pays, souvent avec des comprimés de zinc, pour bien moins d’un dollar par traitement.

Former les familles. Au dispensaire ou lors d’une visite à domicile, un agent de santé montre aux parents comment dissoudre un sachet dans le volume exact d’eau potable imprimé dessus, bouillie puis refroidie si l’on doute de sa source. La solution se donne par petites gorgées fréquentes, à la tasse ou à la cuillère, plus lentement si l’enfant vomit, et ce qui reste au bout d’une journée est jeté. L’allaitement et les repas habituels continuent. L’OMS recommande aussi, pour l’enfant qui a la diarrhée, du zinc pendant 10 à 14 jours, qui raccourcit l’épisode et diminue le risque d’une rechute rapprochée.

Reconnaître la déshydratation. Les soignants cherchent l’agitation, les yeux enfoncés et une soif avide, signes d’une déshydratation modérée. Un enfant qui présente au moins deux des signes suivants est gravement déshydraté : léthargie ou inconscience, yeux enfoncés, incapacité à boire ou difficulté à boire, peau pincée qui revient très lentement. Ces malades, comme toute personne en état de choc, reçoivent d’abord une perfusion dans un centre de santé, puis poursuivent avec les SRO.

Un pli cutané qui met deux secondes ou plus à s'effacer est l'un des signes d'une déshydratation sévère.

Quand consulter sans attendre. On apprend aux parents à revenir tout de suite si l'enfant devient somnolent, ne peut plus boire, vomit sans arrêt, a du sang dans les selles, n'urine plus depuis de nombreuses heures ou ne va pas mieux. Les très jeunes nourrissons et les enfants dénutris doivent être vus par un soignant dès le début.

Un agent de santé montre à une mère comment vider tout le sachet dans le volume d'eau potable imprimé dessus.

> **Sécurité.** Utilisez des sachets de SRO tout prêts, dissous exactement dans le volume d'eau potable indiqué dessus. Trop de poudre rend la solution dangereuse, trop d'eau la rend moins efficace. Faute de sachet, continuez à donner de l'eau potable, du bouillon ou le sein, évitez les boissons très sucrées et consultez. Les SRO ne remplacent pas les soins : la déshydratation peut tuer un petit enfant en quelques heures, et toute personne qui présente des signes de danger doit être conduite sans délai dans un centre de santé.

Histoire et évolution

En 1832, à Leith près d'Édimbourg, Thomas Latta suit une idée de William O'Shaughnessy et injecte de l'eau salée dans les veines de mourants. Certains reviennent à la vie, mais Latta meurt l'année suivante et la méthode tombe dans l'oubli pendant un demi-siècle.

Dans les années 1960, la perfusion saline, perfectionnée par le médecin de l'US Navy Robert Phillips, fait tomber la mortalité du choléra sous 1 %, mais elle demande du liquide stérile, des aiguilles et du personnel formé. À Dacca, alors au Pakistan oriental, et dans un centre de l'université Johns Hopkins à Calcutta, des chercheurs essaient le glucose et le sel par la bouche. En 1968, Norbert Hirschhorn montre que le glucose réduit les pertes nettes de selles, et David Nalin et Richard Cash rapportent que, chez les malades qui boivent la solution, le volume perfusé baisse de 80 %. La planche retient la date de 1968.

Les injections de Latta exigeaient une seringue, une veine et un médecin au chevet du malade.

Pendant la guerre de 1971, le choléra éclate parmi les réfugiés du Pakistan oriental près de Bongaon, en Inde. Faute de perfusions en quantité suffisante, l'équipe de Dilip Mahalanabis les réserve aux cas les plus graves et traite les autres par la bouche. Sur 3 703 malades admis dans son centre, 3,6 % meurent, alors qu'au début de l'épidémie le choléra tuait près de 30 % des malades. Le rapport ne paraît qu'en 1973.

L'OMS et l'UNICEF s'accordent sur une formule unique en 1975, et en 1978 The Lancet qualifie la découverte de « progrès médical potentiellement le plus important du siècle ». De 1980 à 1990, l'organisation bangladaise BRAC envoie des agents de porte en porte enseigner à plus de 12 millions de mères une boisson maison de sel et de sucre brut. L'OMS recommande au début des années 2000 une formule à osmolarité réduite, et une déclaration commune avec l'UNICEF la promeut en 2004 avec le zinc.

Les estimations des enfants sauvés vont de plus de 50 millions entre 1982 et 2007 à plus de 70 millions en 2019, même si l’eau potable, l’assainissement et les vaccins y ont aussi contribué.

Chiffres clés

Essai de Nalin et Cash
The Lancet, août 1968 : volume perfusé réduit de 80 %

Formule à osmolarité réduite de l'OMS
245 mOsm/l, contre 311 pour la solution d'origine

Enfants sauvés, 1982–2007
Plus de 50 millions (estimation de Fontaine, Garner et Bhan)

Centre de traitement de Bongaon, 1971
3,6 % de décès sur 3 703 malades du choléra, contre près de 30 % au début de l'épidémie

Décès par diarrhée avant 5 ans
Environ 444 000 par an (OMS, 2024)

Sources

1. Diarrhoeal disease (fact sheet, 7 March 2024) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease
2. Cholera (fact sheet) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cholera
3. Clinical management of acute diarrhoea: WHO/UNICEF joint statement (2004) · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/WHO_FCH_CAH_04.7
4. Oral rehydration salts (ORS) and zinc · UNICEF Supply Division https://www.unicef.org/supply/oral-rehydration-salts-ors-and-zinc
5. Zinc and ORS (S. Singh, 2007) · Pediatric Oncall Journal, vol. 4 no. 1 https://www.pediatriconcall.com/pediatric-journal/view/fulltext-articles/165/J/0/0/251/0
6. Robert K. Crane: Na+-glucose cotransporter to cure? (K. L. Hamilton, 2013) · Frontiers in Physiology https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2013.00053/full
7. Oral rehydration therapy: a low-tech solution that has saved millions of lives · Our World in Data https://ourworldindata.org/oral-rehydration-therapy
8. Magic bullet: the history of oral rehydration therapy (J. N. Ruxin, 1994) · Medical History, vol. 38 no. 4 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1036912/
9. Leith in the time of cholera: the story of Thomas Latta (G. A. Venters) · Hektoen International https://hekint.org/2017/02/01/leith-in-the-time-of-cholera-the-story-of-thomas-latta/
10. Treatment of cholera: Robert Allan Phillips (1967 Clinical Medical Research Award) · Lasker Foundation https://laskerfoundation.org/winners/treatment-of-cholera/
11. A simple solution: the history of ORS in Bangladesh · The World (PRX) https://theworld.org/stories/2013/06/25/simple-solution-history-ors-bangladesh
12. Oral fluid therapy of cholera among Bangladesh refugees (Mahalanabis et al., 1973) · Johns Hopkins Medical Journal, vol. 132 no. 4 https://pure.johnshopkins.edu/en/publications/oral-fluid-therapy-of-cholera-among-bangladesh-refugees-5/
13. Treating cholera · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/cholera/treatment/

Faits vérifiés le 2026-10-14

Index

Accumulateur au plomb . . . 306
Acier . . . 142
Aluminium . . . 338
Ampoule à incandescence . . . 324
Anesthésie . . . 296
Aqueduc . . . 147
Arc & flèches . . . 18
Arc et voûte . . . 74
Avion . . . 355
Béton armé . . . 311
Béton romain . . . 167
Bicyclette . . . 255
Bière . . . 79
Boussole . . . 196
Briques . . . 40
Bronze . . . 125
Cadran solaire . . . 107
Caoutchouc vulcanisé . . . 292
Cellule solaire . . . 372
Céramique . . . 23
Charbon de bois . . . 65
Charrue . . . 61
Chaux et mortier de chaux . . . 31
Ciment Portland . . . 259
Collier d'attelage . . . 180
Conserves & pasteurisation . . . 250
Corde & cordage . . . 13
Distillation . . . 176
Eau potable . . . 35
Écriture . . . 87
Engrenages . . . 155
Éolienne . . . 342
Fromage . . . 57
Générateur électrique . . . 276
Grue & poulie . . . 151
Horloge mécanique . . . 203
Hygiène et antisepsie . . . 301
Irrigation . . . 52
Locomotive à vapeur . . . 246
Lunette astronomique . . . 220
Lunettes de vue . . . 199
Machine à coudre . . . 272
Machine à vapeur . . . 229
Maîtrise du feu . . . 9
Mesures et étalons . . . 129
Métallurgie du fer . . . 138
Microscope . . . 216
Montgolfière . . . 233
Moteur à combustion interne . . . 316
Moteur électrique . . . 280
Moulin à vent . . . 188
Navigation astronomique . . . 212
Numération de position . . . 99
Ordinateur . . . 368
Outils de pierre . . . 5
Pain . . . 27
Papier . . . 172
Pénicilline . . . 359
Photographie . . . 263
Pile électrique . . . 242
Pompe à piston . . . 163
Poudre noire . . . 184
Presse à imprimer . . . 207
Radio . . . 347
Radiographie . . . 351
Réfrigération . . . 284
Réhydratation orale . . . 377
Rotation des cultures . . . 111
Roue & essieu . . . 83
Roue hydraulique . . . 159
Rouet . . . 192
Salaison . . . 48
Savon . . . 95
Serrure & clé . . . 116
Tannage du cuir . . . 103
Teinture . . . 70
Télégraphe électrique . . . 288
Téléphone . . . 320
Thermomètre et baromètre . . . 224
Tissage . . . 44
Tour de potier . . . 121
Transformateur . . . 333
Transistor . . . 364
Turbine à vapeur . . . 328
Turbine hydraulique . . . 267
Vaccination . . . 237
Verre . . . 134
Voile . . . 91

Comment le codex est fait

Chaque planche est rédigée à partir de sources : musées, encyclopédies, travaux universitaires et références techniques. Les dates et les chiffres sont vérifiés sur au moins deux sources indépendantes, citées en bas de chaque planche, et chaque planche est relue avant d'être publiée. Quand les sources divergent, le texte le dit.

Les illustrations des planches sont produites avec un outil de génération d'images, puis vérifiées à la main : chaque mécanisme, chaque nombre de pièces et chaque liaison est comparé aux sources. Les figures interactives sont dessinées en code à partir d'un modèle de la machine.

Les mots techniques sont expliqués dans le glossaire.

Propriété intellectuelle

Les textes, planches et figures de The Last Codex sont des œuvres originales d'Etienne Debost, publiées sous licence Creative Commons Attribution, Pas d'utilisation commerciale, Pas de modification 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr). Vous pouvez les copier et les partager, y compris le site entier pour le lire hors ligne, à condition de citer The Last Codex et son adresse, de ne rien modifier et de n'en faire aucun usage commercial. Tout autre usage demande une autorisation écrite. La mise en page et le code du site n'entrent pas dans cette licence : tous droits réservés.

Icônes : game-icons.net (CC BY 3.0) et Phosphor (MIT). Polices : EB Garamond, Source Sans 3 et IBM Plex Mono (SIL Open Font License).