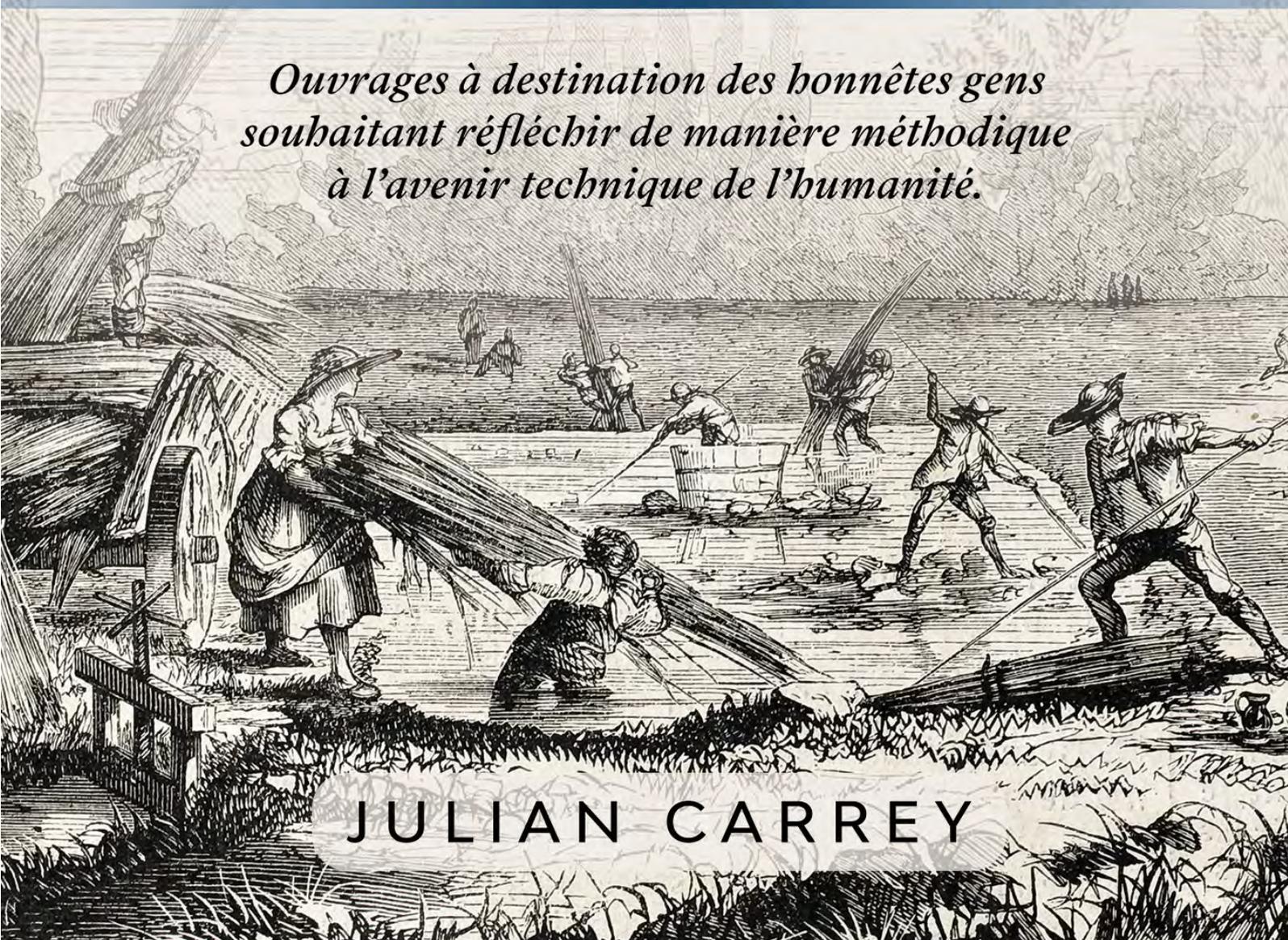


SANS  
**PÉTROLE**  
ET SANS  
**CHARBON**

TOME 1 :  
TECHNIQUES ET ÉNERGIES DANS  
LES SOCIÉTÉS PRÉINDUSTRIELLES

*Ouvrages à destination des honnêtes gens  
souhaitant réfléchir de manière méthodique  
à l'avenir technique de l'humanité.*



JULIAN CARREY

**Julian CARREY**

# **SANS PETROLE ET SANS CHARBON**



*Ouvrages à destination des honnêtes gens souhaitant réfléchir de manière méthodique à l'avenir technique de l'humanité.*

## **TOME I**

**Techniques et énergies dans les sociétés préindustrielles.**

**2020**

Réalisation des versions numériques : IS Edition, via son label **Libres d'écrire**

ISBN : 978-2-37692-227-8

**Tout droit de reproduction, d'adaptation et de traduction intégrale ou partielle réservé pour tout pays.**

# TABLES DES MATIÈRES

Introduction à la série d'ouvrages « Sans pétrole et sans charbon ».....	5
Introduction au Tome I.....	9
<u>I. Du Néolithique à la fin de l'antiquité</u> .....	13
A. Agriculture et élevage.....	13
B. L'eau.....	25
C. Céramique et verrerie.....	31
D. Extraction minière et métallurgie.....	37
E. La chimie.....	52
F. Vêtements, tissus et cordage.....	56
G. L'habitat.....	61
H. Feu et lumière.....	71
I. Transports et communications.....	75
J. La médecine.....	84
<u>II. Le Moyen Âge en Occident</u> .....	93
A. Moulins et mécanismes.....	93
B. Agriculture et élevage.....	100
C. Extraction minière, métallurgie, poterie et verrerie.....	108
D. La chimie.....	128
E. Textiles et cuir.....	139
F. Construction et fabrication.....	152
G. Eau, hygiène et confort.....	168
H. Transports et communications.....	181
I. La médecine.....	191
<u>III. La révolution industrielle</u> .....	202
A. Le coke et la sidérurgie.....	203
B. La machine à vapeur.....	208
C. Les rétroactions positives.....	213
<u>IV. Une transition énergétique</u> .....	221
A. Quelques mots sur l'énergie.....	221
B. Types d'énergie et rendement dans le système énergétique traditionnel.....	222
C. Répartition dans le système énergétique traditionnel.....	230
D. La transition vers le système énergétique moderne.....	234
E. L'évolution du système traditionnel pendant et après la révolution industrielle.....	239
Conclusion.....	255
Bibliographie.....	259

## INTRODUCTION A LA SERIE D'OUVRAGES « SANS PETROLE ET SANS CHARBON »

Dans un futur plus ou moins lointain, l'humanité aura consommé ses énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) énergétiquement rentables, choisi de ne plus les utiliser pour éviter un trop fort dérèglement climatique, ou ne disposera plus des technologies ou des savoir-faire nécessaires pour les exploiter en grande quantité. L'objectif de ces ouvrages n'est pas d'apporter des éléments permettant de discuter de cette assertion, car l'épuisement inéluctable des ressources fossiles est, quand on y réfléchit bien, peu discutable. Un débat autour de cette question porte bien évidemment sur le *quand*, mais nous ne nous y aventurons pas, considérant simplement que cette problématique est suffisamment importante pour que, quelle que soit l'échéance, nous y réfléchissions dès à présent.

Le second débat autour de cette question porte sur le fait de savoir si l'arrêt des énergies fossiles portera un coup fatal à notre civilisation occidentale hyper-technologisée ou non. Pour résumer de manière caricaturale le débat, certains pensent que la fin des énergies fossiles n'est pas un problème car l'humanité exploitera d'autres solutions technologiques (énergies renouvelables, fusion nucléaire, fission nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération, technologie de rupture) qui permettront d'assurer un avenir radieux à l'humanité – ou du moins à une partie d'entre elle – pour des millénaires, avec un niveau de complexité technologique comparable ou supérieur à celui que nous avons actuellement dans les pays dits développés. D'autres pensent qu'aucune solution technologique ne nous permettra de maintenir cette complexité à – suivant les gens – court, moyen, ou long terme, en l'absence de la source d'énergie très concentrée et sans équivalent que constituent les énergies fossiles. C'est dans ce contexte que se situent ces ouvrages : peut-on réfléchir de manière rationnelle et méthodique à ces questions ?

Plus précisément, la question à laquelle nous souhaitons réfléchir est la suivante: « *En l'état actuel de nos connaissances, à quel niveau de complexité technologique une société n'utilisant pas les énergies fossiles peut-elle prétendre tout en restant à l'équilibre pendant plusieurs millénaires?* ». Ce que nous entendons par « à l'équilibre » est « *qui se renouvelle à peu près à l'identique* ». Pour prendre un contre-exemple, une société dont le système de production énergétique ou la densité de population évolue fortement dans le temps n'est pas « à l'équilibre ». De même, une consommation trop élevée de ressources renouvelables ou non-renouvelables ne permet pas de maintenir un système technique dans le même état pendant plusieurs millénaires, obligeant à son évolution pour s'adapter à une raréfaction des ressources. Une autre manière, plus simple, de formuler la même question est : « *à quoi pourrait donc ressembler un système technique pérenne ?* ». La notion de pérennité sera développée plus amplement au cours du deuxième tome de cette série d'ouvrages.

L'étude du passé renferme déjà des premières réponses à ces questions. Ainsi, certaines sociétés traditionnelles ou préindustrielles, composées majoritairement de chasseurs-cueilleurs, d'agriculteurs ou d'éleveurs, se sont perpétuées avec un système technique relativement inchangé pendant des millénaires. D'autres ont évolué lentement, sur des centaines d'années ou des millénaires, vers des systèmes techniques plus complexes. Dans les quelques siècles précédant la révolution industrielle en Europe, des proto-industries se sont développées, impliquant fortement les campagnes dans la production manufacturière, au sein de systèmes techniques requérant une organisation à relativement large échelle. Ces systèmes techniques précédant de peu la révolution industrielle étaient-ils pérennes, alors qu'ils prenaient place dans une période où le charbon commençait déjà à être utilisé, et où les craintes liées à la déforestation et à une utilisation trop intensive du bois étaient déjà très présentes ? Et ceux les ayant précédés ou étant toujours en place dans d'autres régions du monde à la même époque étaient-ils plus pérennes ? Cela fait partie des problématiques qui seront abordées dans ces ouvrages.

Quant à toutes les techniques apparues après la révolution industrielle, elles posent un gros défi. La révolution industrielle a débuté avec une utilisation massive du charbon sur laquelle s'est ensuite construite toute la suite : l'utilisation de l'électricité comme vecteur d'énergie, le développement de l'hydroélectricité, le forage du pétrole, le développement de centrales nucléaires, etc. On peine à imaginer ce qu'il pourrait advenir de notre édifice technologique actuel lorsque la brique de base (le charbon) et deux autres briques essentielles (pétrole, gaz) n'en feront plus partie. Nous ne nous aventurerons pas à réfléchir directement à cette problématique, mais notre intuition nous laisse penser que réussir à maintenir la globalité de l'édifice en leur absence est très certainement impossible.

Notre méthodologie pour discuter de la pérennité des systèmes techniques sera la suivante. Dans un premier temps nous souhaitons nous pencher sur les systèmes techniques du passé n'utilisant pas les énergies fossiles, et discuter de leur éventuelle pérennité. Cela ne nécessite pas qu'ils aient *démontré* cette pérennité en restant inchangés pendant des millénaires, car extrêmement peu de systèmes techniques remplissent cette condition. En revanche, nous aurons à discuter si certains *auraient pu* rester plus ou moins identiques pendant plusieurs millénaires, en nous penchant sur les consommations de ressources et éventuelles dégradations environnementales qui leur étaient associées. Une autre question qui peut se poser est celle de la relation entre pérennité et complexité : l'augmentation de la complexité technique se fait-elle au détriment de la pérennité, ou pas nécessairement ? Nous tenterons de voir à travers quelques exemples ce qu'il en est.

Une fois certains systèmes techniques pérennes identifiés, une seconde étape consistera à étudier si des technologies ou des connaissances scientifiques modernes pourraient être intégrées à ces systèmes techniques. Si on découvrait

que, par exemple, le système technique du haut Moyen Âge (V<sup>ème</sup> - X<sup>ème</sup> siècle) était plus ou moins pérenne, on pourrait étudier si la méthanisation, le vélo, le moteur électrique ou l'anesthésie générale pourrait être intégrés à ce système technique, à condition d'utiliser des moyens de production de l'époque. Evidemment, chercher à intégrer une technologie complexe à un système technique donné nécessitera d'étudier toutes les techniques intermédiaires nécessaires à sa production. Par exemple, fabriquer un moteur électrique au Moyen Âge nécessiterait d'étudier la fabrication d'aimants permanents, de rotors, de roulements à bille, et de fils entourés d'isolant électrique. Il s'agira également d'étudier si, après l'ajout d'une nouvelle technique, le nouveau système resterait pérenne: la nouvelle technique pourrait-elle être maintenue pendant plusieurs millénaires ?

En quelque sorte, notre approche nécessite de se demander ce qu'un ou une scientifique moderne serait capable de réaliser si il ou elle était placée dans un système technique du passé. Pour reprendre l'analogie avec l'édifice et ses briques, nous ne chercherons pas à réfléchir à la manière de maintenir notre édifice actuel en équilibre, mais plutôt à réfléchir à la construction d'un nouvel édifice, en partant d'une base connue du passé, avec comme contrainte de n'utiliser que des techniques pérennes, qui pourraient être maintenues pendant des millénaires.

Notre série d'ouvrages sera organisée en trois tomes de nature assez différente les uns des autres. Le premier tome, très illustré, présentera une histoire des techniques et de l'énergie couvrant la période allant du Néolithique à la révolution industrielle. Ceci nous permettra de découvrir quelles sont les techniques « sans charbon et sans pétrole » qui furent développées et utilisées par les anciens. Nous pencher en détail sur ces dizaines de millénaires où, sans être moins ingénieux que nous, nos ancêtres n'utilisaient pas, ou très peu, les énergies fossiles, nous paraît être un préalable indispensable à toute réflexion sur notre avenir. Certaines techniques anciennes sont bien connues, y compris du grand public : qu'on pense aux procédés d'allumage du feu dans la préhistoire ou aux aqueducs romains, mais d'autres le sont beaucoup moins. Se plonger dans l'histoire humaine par le biais de la technique est par ailleurs une expérience passionnante, indépendamment du sujet qui nous préoccupe ici. Ce tome comportera également une analyse énergétique détaillée des systèmes techniques préindustriels, et de la transition énergétique s'étant opérée lors de la révolution industrielle. Le cas de la France et de l'Angleterre y seront notamment étudiés en détail. Enfin, la manière dont les systèmes de production d'énergie mécanique d'origine renouvelable (moulins à eau et à vent) ont évolué à la suite de la révolution industrielle sera présentée, illustrant la nécessité d'avoir accès à une quantité d'énergie thermique importante pour augmenter le rendement et la puissance de ces sources d'énergie.

Le deuxième tome, après quelques détails méthodologiques et discussions préalables concernant les mécanismes à l'origine des évolutions techniques des

sociétés humaines, rentrera dans le vif du sujet. Nous étudierons successivement plusieurs exemples précis de systèmes techniques du passé, de complexité croissante, incorporant progressivement de nouvelles briques pouvant éventuellement avoir une influence sur leur pérennité : agriculture, métallurgie, etc. Seront ainsi étudiés les systèmes techniques utilisés par les Fuégiens (chasseurs-cueilleurs de la Terre de Feu), les aborigènes australiens, les Tikopiens (habitants d'une île isolée du Pacifique), les agriculteurs irlandais, et les français au Moyen Âge. Chaque système technique fera l'objet d'une présentation de ses éléments constituant et d'une étude détaillée portant sur, entre autres, ses impacts environnementaux, et son utilisation des ressources renouvelables et minérales.

Le troisième tome sera l'occasion d'une réflexion brique élémentaire par brique élémentaire. Nous étudierons des techniques précises qui ne sont historiquement apparues qu'après la révolution industrielle, et dont nous pensons, pour différentes raisons, qu'elles pourraient avoir un intérêt pour les sociétés humaines. Elles couvriront de nombreux aspects de la vie humaine : production alimentaire, production d'énergie, médecine, transport, ... Ce troisième tome sera composé de nombreux articles, chacun traitant d'un objet en particulier, se penchant sur les conditions historiques de son apparition, son rôle sociétal, ses conditions de production, ses impacts environnementaux et son éventuelle incorporation dans un système technique pérenne. Ces différents articles nous permettront d'avancer dans la détermination de systèmes techniques qui pourraient assurer le bien-être des humains sur le long terme. Ce dernier tome s'achèvera par une discussion sur les aspects sociaux, et élargira donc la réflexion des systèmes techniques vers les systèmes socio-techniques. En effet, au-delà des aspects purement techniques, la pérennité d'une société ne peut s'envisager que si ses structures sociales et politiques, ses valeurs et ses règles de fonctionnement sont adaptées à la recherche du maintien du bien-être de ses membres sur le long terme.

# INTRODUCTION AU TOME I

Ce premier tome a comme objectif principal de fournir au lecteur ou à la lectrice n'ayant au préalable jamais réfléchi à un avenir technique de l'humanité « sans pétrole et sans charbon » des éléments que nous considérons comme étant utiles pour le faire. Pour cela, il nous paraît important, dans un premier temps, de nous pencher sur les techniques qui ont été utilisées pendant des millénaires par les anciens, avant la révolution industrielle. Les chapitres I et II chercheront ainsi à plonger la lectrice ou le lecteur dans l'*ambiance technique* d'époques révolues. Le chapitre I s'étendra du Néolithique<sup>1</sup> à la fin de l'Antiquité, et évoquera les techniques utilisées dans les civilisations mésopotamienne, égyptienne, chinoise, pré-colombienne, islamique, indienne, grecque, et romaine. Le chapitre II s'étendra du Moyen Âge en occident jusqu'à la révolution industrielle. Dans le Chapitre I, lorsque nous traiterons de l'Antiquité, l'accent sera souvent mis sur l'histoire du continent européen, dans un souci de continuité avec le Chapitre II. Nous tenterons de nous faire pardonner ce biais lors du deuxième tome, au cours duquel plusieurs systèmes techniques extra-européens seront présentés et étudiés en détail.

ancien    récent



*Localisation approximative des civilisations dont il sera question dans les deux premiers chapitres de ce livre.*

Nous avons tenté de rendre ces deux chapitres à la fois synthétiques et pédagogiques, et essayé de prendre soin de notre lecteur ou lectrice néophyte en

---

<sup>1</sup> Le Néolithique correspond à la période à laquelle les humains commencèrent à utiliser l'élevage et l'agriculture pour subvenir à leurs besoins.

histoire des techniques, en explicitant de nombreux termes. Ainsi, nous supposons qu'il ou elle ne sait pas forcément ce qu'est un moulin à foulon, la nitre, un hypocauste ou une herminette. Afin de ne pas alourdir le texte, de nombreuses définitions ou descriptions succinctes sont fournies dans des notes de bas de pages. Nous avons également souhaité multiplier les illustrations, pour rendre toutes les techniques et machines dont il est question les plus concrètes possibles. Ainsi, chaque fois qu'un mot est inscrit en gras dans le texte, des illustrations s'y rapportant sont disponibles. Nous avons cherché à donner quelques repères temporels et géographiques à l'apparition des techniques, mais sans trop de détails, car tel n'est pas le propos de ce livre. De plus, les progrès en archéologie conduisent à régulièrement réévaluer les lieux et dates d'apparitions des techniques, qui sont ainsi souvent sujets à discussion ou fluctuations. Même si nous ne le précisons pas à chaque fois, toutes les dates sont ainsi entendues approximatives, et sujettes à révision. Également, les « inventeurs » et « l'histoire des inventions » ne sont pas, sauf exceptions, précisées, car nous nous intéressons plus ici à l'histoire de l'humanité qu'à l'histoire des individus qui la composent. Enfin, nous avons choisi de négliger certaines parties de l'histoire des techniques: les armes, le papier, l'imprimerie, les colorants et les arts n'ont ainsi pas été traités<sup>2</sup>. Que les lectrices et lecteurs veuillent bien nous en excuser.

Civ. mésopotamienne	Autour de l'Irak et la Syrie actuels.	Elle débute aux environs de -3000 et se termine en -331 par la conquête du grec Alexandre le Grand.
Civ. égyptienne	Autour de la vallée du Nil, dans l'Égypte actuelle	Elle s'étend de -3000 à -332. Elle se termine par la conquête d'Alexandre le Grand.
Civ. de la vallée de l'Indus	Autour du fleuve Indus, situé dans le Pakistan actuel.	Elle débute vers -3000 et décline à partir de -1900.
Civ. pré-colombiennes	Plusieurs civilisations se sont succédées en Amérique avant l'arrivée des Européens.	Elles débutent vers -3000. 1492 marque le début de leur disparition.
Civ. chinoise	Débute dans une région située à l'Est de la Chine actuelle. Plusieurs empires se succèdent, localisés sur le territoire actuel de la Chine, la Mongolie, la Russie et du Japon.	La première dynastie chinoise date de -2000.

<sup>2</sup> En dépit de notre intérêt pour les arts et l'ornementation, nous ne les avons pas inclus dans cet ouvrage, ayant choisi de traiter plutôt les techniques associées aux besoins physiologiques des humains (boire, se nourrir, se chauffer, rester en bonne santé). Les techniques de transmission de l'information écrite seront traitées sous une forme spécifique dans le troisième tome. Quant aux armes, qui sont basées sur une continuelle escalade entre moyens d'attaques et moyens de défense, elles posent un problème spécifique dans la réflexion sur les systèmes techniques pérennes puisque, dans des sociétés en guerre, leur développement n'est jamais plafonné. En cela, elles rejoignent la médecine qui, parmi les quatre besoins physiologiques cités plus haut, est également dans ce cas-là. Néanmoins, nous considérons que se soigner quand on est malade est un besoin fondamental – ou *a minima* une envie très répandue – qui nécessite que nous l'abordions depuis l'angle de la technique, alors que tuer son prochain ne l'est pas, et nécessite plus une réflexion philosophique et politique. Cette réflexion sur les structures sociales permettant la pérennité de systèmes techniques sera abordée dans le troisième tome.

Civ. grecque	Dans la Grèce actuelle ; elle comprend également plusieurs colonies.	L'« âge d'or » de la civilisation grecque débute aux environs de -600 et se termine par la conquête des Romains en -146.
Civ. romaine	Rome dirigea progressivement un empire qui couvrit tout le bassin méditerranéen.	Rome fut fondée en -753. En 395, l'Empire romain est séparé en deux, l'Empire d'Orient et celui d'Occident. En 476, le dernier empereur romain d'Occident abdique. L'Empire romain d'Orient débutant en 476 est appelé Empire byzantin.
Civ. byzantine	A ses débuts, comprend tout l'est du bassin méditerranéen.	L'empire byzantin débute en 476 et se termine par la prise de Constantinople par les Ottomans en 1453.
Civ. islamique	Débute dans la péninsule arabique et s'étend ensuite à une grande partie du monde méditerranéen et en Asie.	Elle débute au VII <sup>ème</sup> siècle avec la naissance de la religion islamique. Son « âge d'or » est considéré comme s'achevant progressivement à partir du XII <sup>ème</sup> siècle.
Moyen Âge	Période plus qu'une civilisation	Cette période historique débute en 476 avec la fin de l'Empire romain d'Occident. Nous considérerons qu'il s'achève avec la révolution industrielle, suivant ainsi l'historien J. Le Goff à ce sujet.

*Quelques repères géographiques et temporels succincts concernant les civilisations dont il sera question dans ce livre.*

Le chapitre III, plus bref que les précédents, s'intéressera aux aspects techniques de la révolution industrielle, et permettra notamment de comprendre l'origine de l'emballement de la production énergétique ayant eu lieu lors de cette période. On y découvrira ainsi les nombreuses rétroactions ayant entraîné à la fois l'augmentation considérable de la production de charbon et celle des machines à vapeur.

Le chapitre IV sera plus complexe et plus chiffré. Il présentera une analyse quantitative des différentes techniques préindustrielles, et de leur rendement énergétique depuis l'énergie solaire. En effet, aussi surprenant que celui puisse apparaître au premier abord, l'énergie mécanique fournie par un moulin, un cheval, un humain, et l'énergie thermique dégagée dans une cheminée ont toutes une origine commune : le rayonnement du soleil. Il sera ainsi montré pourquoi, compte tenu du faible rendement depuis l'énergie solaire de toutes les techniques préindustrielles, l'énergie disponible par habitant était plafonnée. L'importance relative des différentes sources d'énergie dans l'Empire romain et au Moyen Âge sera quantifiée. Dans un deuxième temps, une analyse détaillée de la transition énergétique ayant eu lieu lors de la révolution industrielle sera présentée, en différenciant l'énergie thermique et l'énergie mécanique, ce qui nous permettra de montrer pourquoi la révolution industrielle est avant tout une révolution thermique, avant d'être une révolution mécanique. Enfin, nous montrerons comment ont évolué les techniques de production d'énergie éolienne et hydraulique après la révolution industrielle,

illustrant là-aussi la nécessité d'une source d'énergie thermique abondante pour augmenter le rendement de ces machines.

Les lecteurs qui souhaiteront approfondir les différents sujets présentés dans ce livre pourront lire les nombreuses références citées en bibliographie, et desquels nos informations ont été tirées.

# CHAPITRE I : DU NEOLITHIQUE A LA FIN DE L'ANTIQUITE

## A. Agriculture et élevage

Les humains, avant la révolution néolithique qui vit le développement de l'agriculture et de l'élevage, vivaient de chasse, pêche et cueillette. Les végétaux consommés (graines, glands, racines, jeunes pousses, fruits, champignons, fougères, etc) étaient collectés dans la nature. La pêche était pratiquée en utilisant des **harpons**, des nasses, ou en pratiquant la pêche à la ligne [*Note de l'auteur : à chaque mot en gras est associé une illustration*]. Concernant la chasse, on utilisait principalement la **sagaie** et, dans certaines sociétés des arcs et des flèches. Les pointes de ces armes étaient fabriquées en bois de cervidés, os, ivoire, ou en pierres taillées. Parmi ces dernières, la plus adaptée à un travail précis, à la confection d'embouts de petite taille et d'outils complexes est le **silex**, qui ne pouvait pas forcément être obtenu facilement localement. D'autres types de roches, comme le quartz, étaient également utilisées. Les embouts étaient emmanchées dans les hampes<sup>3</sup>, et la fixation consolidée à l'aide de résine, de colle – obtenue en faisant bouillir des peaux – ou de ligatures en boyaux et fibres de tendons (Cheynier, 1958 ; Passemard, 1917 ; Rozoy, 1992).

RMN-Grand Palais (musée d'Archéologie nationale) / Jean Schormans



Pointes de harpons en bois de renne, France, -17000 / -11000

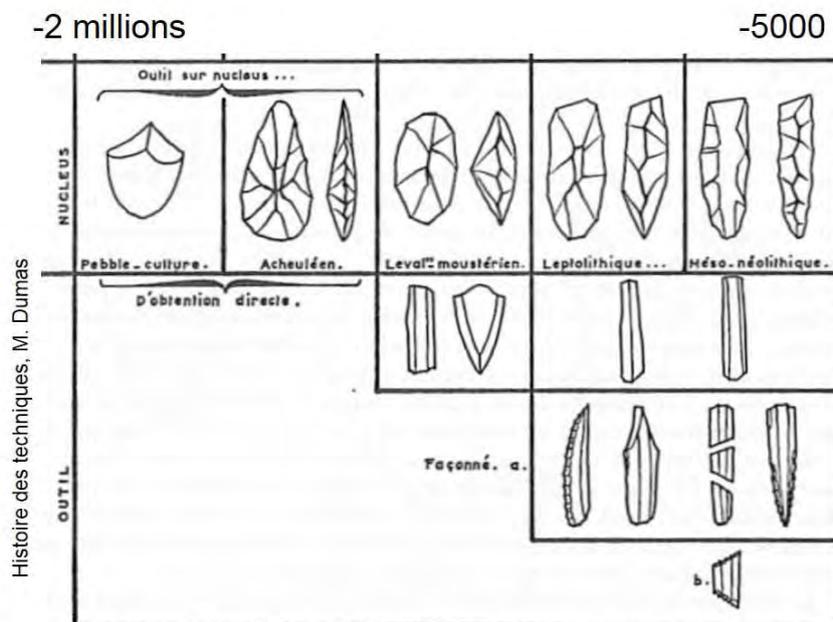
## harpons

<sup>3</sup> La hampe est la partie en bois des flèches, sagaies ou harpons.



Pointes de sagaies en os de rennes, France, -12000 / -10000

## sagaie

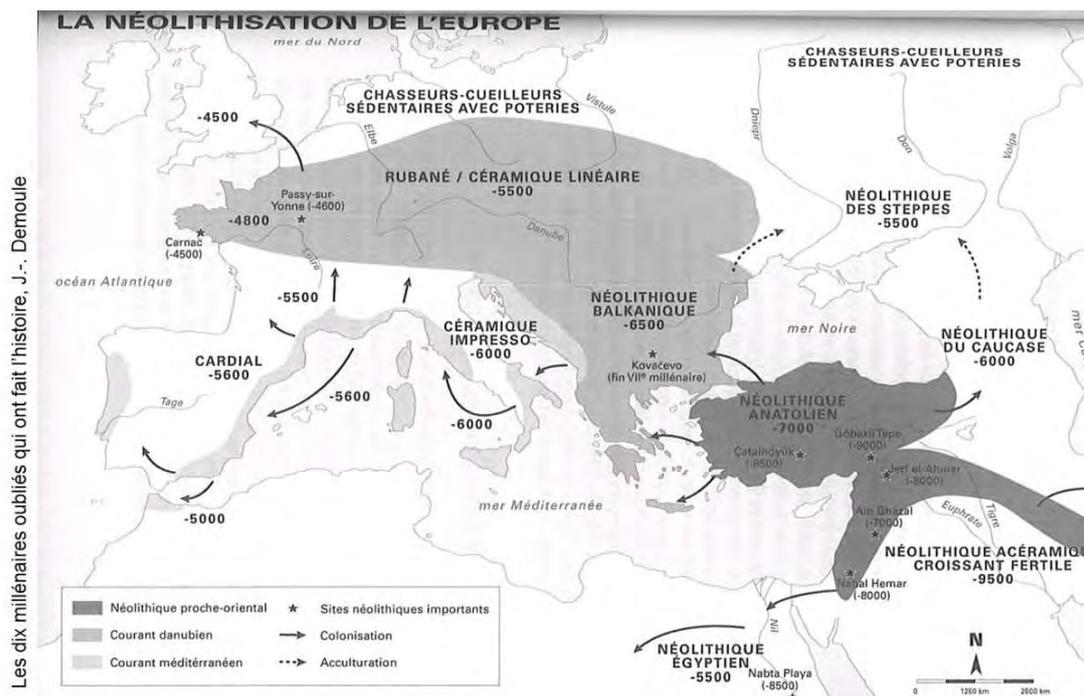


Evolution des techniques de taille des silex

## silex

Le développement de l'agriculture s'est opéré de manière indépendante et parallèle, dans plusieurs régions du monde entre - 10000 et -7000. On identifie actuellement 8 **foyers** indépendants : le bassin du Mississipi, le Mexique, l'Amazonie, les Andes, l'Afrique, le Proche-Orient, la Chine et la Nouvelle-Guinée (Demoule, 2017). Lors de cette transition, qui se fit de manière lente, on se mit progressivement à consommer de plus en plus de végétaux, à les sélectionner et à les semer. Le moteur de cette transformation sera discuté dans le deuxième tome. Sur le continent européen, c'est au cours du IX<sup>ème</sup> millénaire avant notre ère qu'une certaine sédentarisation commença en Mésopotamie, suivie deux millénaires plus tard par l'apparition de l'agriculture. Cette dernière fut accompagnée du développement d'un grand nombre d'outils et de techniques spécifiques liés à la récolte, au traitement, et à la conservation des produits

agricoles. Ainsi, l'éventuel défrichage ou abattage d'arbres nécessaire à l'installation des champs se faisait à l'aide d'une **herminette**<sup>4</sup>, le travail de la terre à l'aide d'une **houe**<sup>5</sup>, et la récolte des céréales à l'aide d'une **faucille** à lame de silex. En parallèle, dans les régions du monde dans lesquelles il existait des espèces adaptées, des animaux furent sélectionnés pour consommer leur viande et/ou leurs œufs, et/ou utiliser leur force mécanique. Les animaux les plus couramment utilisés pour les attelages étaient les bœufs, les buffles et les ânes. Pour tracter, un **joug à cornes**<sup>6</sup> ou un joug de garrot<sup>7</sup>, suivant les animaux, était utilisé. C'est ainsi que le travail du sol en utilisant un **araire**<sup>8</sup> tracté par un animal permit d'étendre les surfaces cultivées. L'araire était entièrement constitué de bois, mais le soc lui-même pouvait être en silex pour être plus dur. Plus tard, la moisson proprement dite a bénéficié de l'apparition de la métallurgie (voir la partie D). Ainsi, les faucilles en métal, plus robustes, font partie des premiers outils métalliques qui furent fabriqués. La faux, qui date de l'époque romaine, n'était pas utilisée pour la moisson, mais pour couper les herbes hautes. C'est également de l'époque romaine que date un premier exemple de **moissonneuse**. Elle était constituée d'un charriot doté de dents métalliques tranchantes et fixes permettant de couper et récupérer les épis.



Propagation de l'agriculture en Europe depuis son foyer dans le Croissant fertile.

## foyers

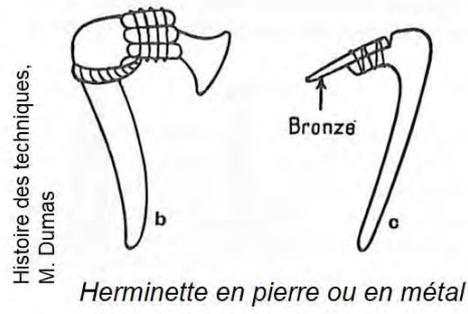
<sup>4</sup> L'herminette ressemble à une hache à l'exception que l'axe du tranchant est perpendiculaire au manche, au lieu d'être aligné avec ce dernier.

<sup>5</sup> La houe, entièrement en bois, est l'ancêtre de la pioche.

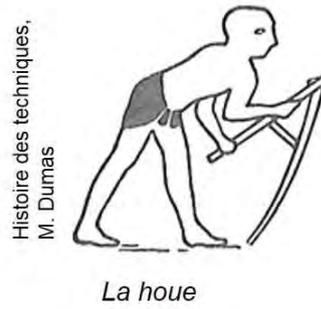
<sup>6</sup> Le joug de cornes ou de tête est au départ un simple bout de bois devant ou derrière les cornes de l'animal et attaché à ces dernières. La forme du bois a ensuite été travaillée pour s'adapter à la morphologie de l'animal.

<sup>7</sup> Le joug de garrot entoure la tête de l'animal.

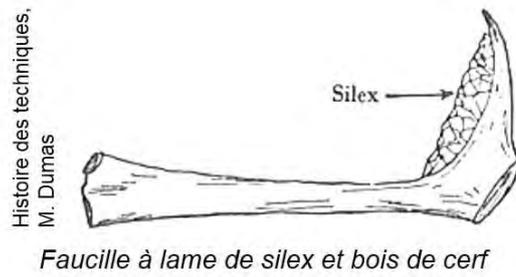
<sup>8</sup> L'araire est un instrument permettant de tracer un sillon peu profond dans le sol, mais ne permettant pas de retourner la terre, contrairement à la charrue.



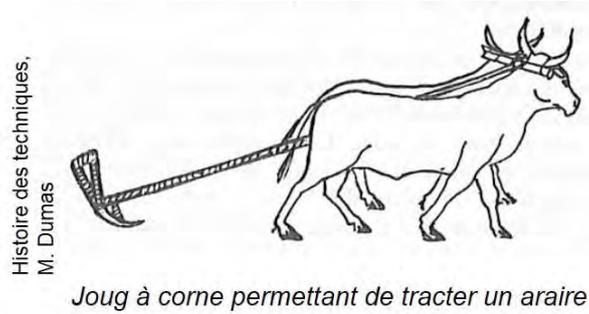
**herminette**



**houe**



**faucille**



**joug à cornes**

Musée de l'Agriculture ancienne du  
Caire – A. du Boistesselin



Araire

## araire

J.-R. Chatillon, musée Saint-Rémi de Reims



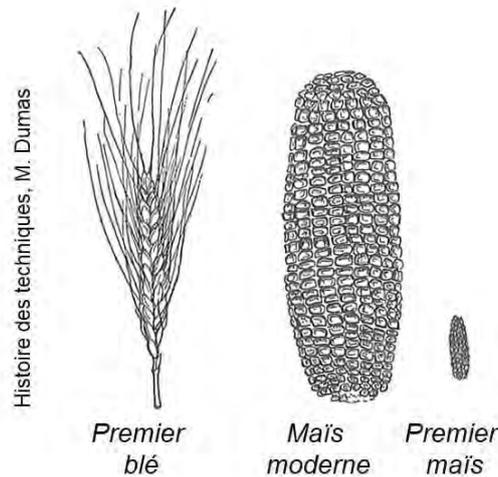
Moissonneuse gauloise

## moissonneuse

Les premiers végétaux cultivés en Mésopotamie comportaient des légumineuses (pois, lentilles, fèves) et des **céréales** (orge, blé, millet). Bien entendu, avec l'apparition ou la diffusion de l'agriculture dans beaucoup de sociétés, les cultures adaptées au climat et aux sols furent utilisées et sélectionnées : olives, riz, raisins, dattes, figues, canne à sucres, bananier, manguier, plantes à épices, ... De même, les systèmes agricoles mis en place dépendaient énormément des conditions locales. Ainsi, en dehors des zones dans laquelle la fertilité des sols était assurée par les crues d'un fleuve (l'exemple du Nil en Egypte est le plus connu), les sols utilisés par les premiers agriculteurs s'épuisaient très vite, les contraignant à laisser leur champ reposer, après deux ou trois récoltes, pendant plusieurs dizaines d'années. Le principal moyen d'enrichir la terre était le fumier, ce qui n'a donc été possible qu'après la domestication des animaux. Dans la vallée de l'Indus, les bouses de vaches ainsi que des herbes étaient rajoutées aux rizières. Les Romains utilisaient également un engrais à base de salpêtre<sup>9</sup>, et les Chinois la chaux<sup>10</sup>. Dans les Andes, on

<sup>9</sup> La salpêtre, également appelé nitre, est du nitrate de potassium ( $KNO_3$ ).

utilisait le guano<sup>11</sup> ou les déjections de lama. La possibilité d'enrichir le sol permettait de diminuer le temps durant lequel on laissait la terre reposer entre deux cultures. C'est ainsi qu'à l'époque romaine, on arriva, avec un enrichissement significatif des sols, et donc un travail important, à un système d'assolement biennal pour la culture des céréales. Dans ce système, alternait sur une parcelle donnée une année de culture et une année de jachère.



## céréales

Beaucoup de productions agricoles nécessitent après la récolte des traitements particuliers, en particulier les céréales. Le premier traitement consiste à séparer le grain de la tige. Pour ce faire, une méthode qui fut utilisée pendant des millénaires, appelée dépiquage, consistait à faire marcher les animaux dessus, sans attelage, ou bien en leur faisant trainer un **rouleau** ou un **tribulum**, une planche garnie de silex. Une seconde méthode possible est le battage, réalisé à l'aide de perches en bois. Le fléau<sup>12</sup> n'apparut que beaucoup plus tard, au IV<sup>ème</sup> siècle en Occident. Un second traitement est le broyage, une opération mécanique importante pour les céréales, puisqu'elle permet de produire de la farine, mais également pour d'autres productions agricoles, comme les cannes à sucre ou les oléagineux, par exemple. Le broyage est une opération longue et difficile, qui fut réalisé dans les premiers temps à l'aide de **meules manuelles**. Le **pilon à riz**, qui était composé d'un poids au bout d'un levier, était également actionné manuellement. Afin de faciliter ces travaux, une première méthode consista à utiliser des animaux dans un **manège**, reliés à une meule ou à un système adapté à la tâche à effectuer. La **meule romaine**, de forme assez aboutie, avait la forme d'un sablier, et était posée sur un support

<sup>10</sup> La chaux est obtenue par le chauffage dans un four fermé à 900°C de calcaire. Celui-ci est majoritairement formé de CaCO<sub>3</sub>, qui se transforme en CaO en libérant du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). On obtient alors de la chaux vive, produit qui réagit fortement avec l'eau, et peut-être éventuellement transformé en chaux « éteinte » (Ca(OH)<sub>2</sub>) après une réaction avec celle-ci. En Amérique précolombienne, la chaux était également fabriquée en calcinant des coquillages.

<sup>11</sup> Le guano est composé de cadavres et déjection d'oiseaux.

<sup>12</sup> Le fléau est un outil composé de deux bâtons de bois reliés par une chaîne ou une corde.

conique. En plus de son usage pour le broyage du grain, elle était utilisée pour broyer les minerais utilisés en métallurgie (voir la partie D). Une deuxième méthode pour faciliter le travail consista à utiliser de l'eau pour entrainer la meule, donnant ainsi naissance à la première machine hydraulique. C'est à la civilisation grecque que l'on doit cette invention, vers le I<sup>er</sup> ou II<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. C'était un **moulin à axe vertical**, dans lequel la meule était sur le même axe que la roue tournante. Le **moulin à axe horizontal**, qui est pour nous le moulin classique, a été décrit pour la première fois par le romain Vitruve, au I<sup>er</sup> siècle avant notre ère. Dans ce moulin, apparut une nouveauté promise à un grand avenir, qui permettait de faire tourner une meule placée sur un axe vertical à partir d'un moulin à axe horizontal : l'engrenage en bois. Notamment, les engrenages à lanterne<sup>13</sup> constituaient une pièce essentielle des mécanismes d'entraînement, permettant d'augmenter la vitesse de rotation de la meule par rapport à celle de la roue. Ces mécanismes d'entraînement en bois ont été utilisés sans évolution notable jusqu'à la révolution industrielle. La **meunerie d'Arles**, qui date du IV<sup>ème</sup> siècle, était une installation romaine particulièrement impressionnante de moulins antiques, constituée de deux rangées de huit roues en série entraînant des meules. On estime sa production quotidienne de farine à 4,5 tonnes. Il est également très probable que les Romains aient utilisé pour moudre le grain des pilons soulevés par un système composé d'une roue hydraulique et d'un arbre à cames<sup>14</sup> (Wilson, 2002). Enfin, on peut noter que le tympan<sup>15</sup>, également appelé cage d'écureuil, initialement utilisé pour actionner les machines à élever l'eau (voir plus loin), a également servi à entrainer des meules.



Droits réservés

*Rouleau (époque moderne)*

## **rouleau**

<sup>13</sup> L'engrenage le plus simple est constitué de cylindres de bois insérés perpendiculairement dans un disque. L'engrenage à lanterne ajoute à ce système un deuxième disque de bois, qui maintient fermement les cylindres.

<sup>14</sup> Dans un arbre à cames, des bouts de bois de formes diverses sont fixés solidairement à l'axe de rotation. Un levier posé sur le bout de bois subit alors un mouvement vertical, dont la nature exacte dépend de la forme du bout de bois. Par exemple, une came de forme rectangulaire soulève lentement le levier puis le laisse retomber brusquement.

<sup>15</sup> Le tympan est une roue mise en mouvement par un ou plusieurs humains ou animaux roulant à l'intérieur ou au-dessus de celle-ci.

J.H. Bishop Vincent, 1884



le-brocanteur.com



(gauche) Peinture de 1884. (droite) Détail de la planche plantée d'éclats de roches.

## tribulum

Muséum du Havre. Photo C. Livonnen



Meule manuelle, néolithique

## meules manuelles

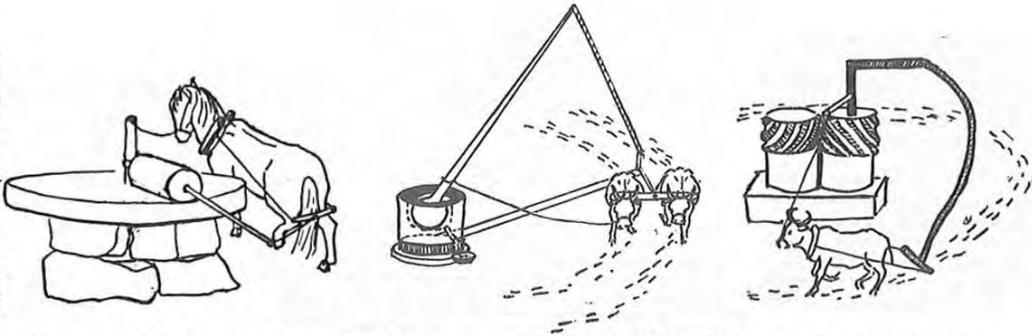
www.autourduriz.com



Pilon à riz thaïlandais contemporain

## pilon à riz

Histoire des techniques, M. Dumas



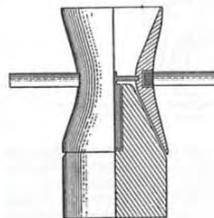
(gauche) Meule-manège pour broyer le grain. (milieu) Manège pour le broyage des cannes à sucre en Inde. (droite) Manège pour le broyage des cannes à sucre en Chine.

## manège

Carl Bloch, 1863



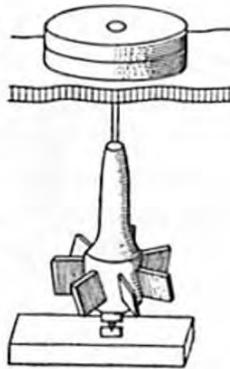
Histoire des techniques, M. Dumas



Peinture et schéma d'une meule romaine

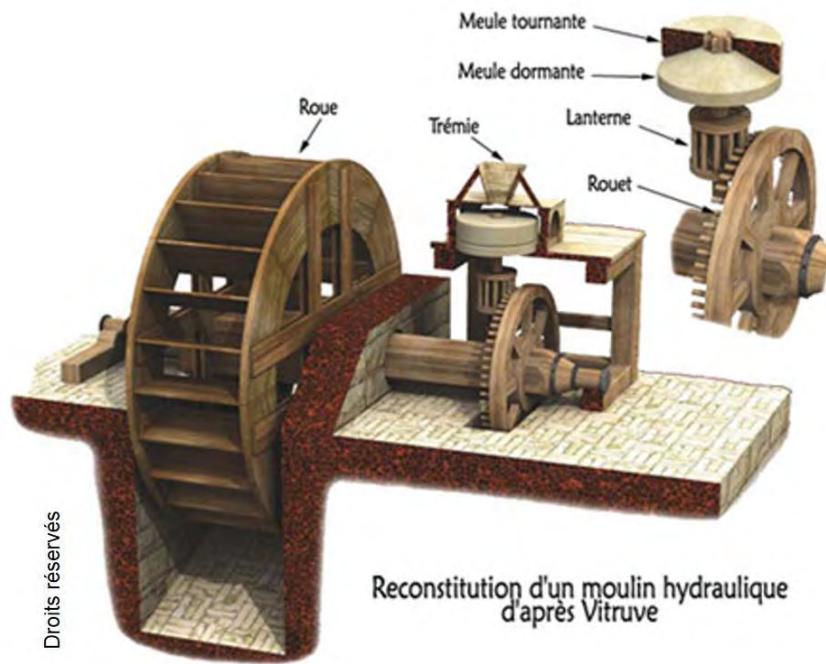
## meule romaine

Histoire des techniques, M. Dumas



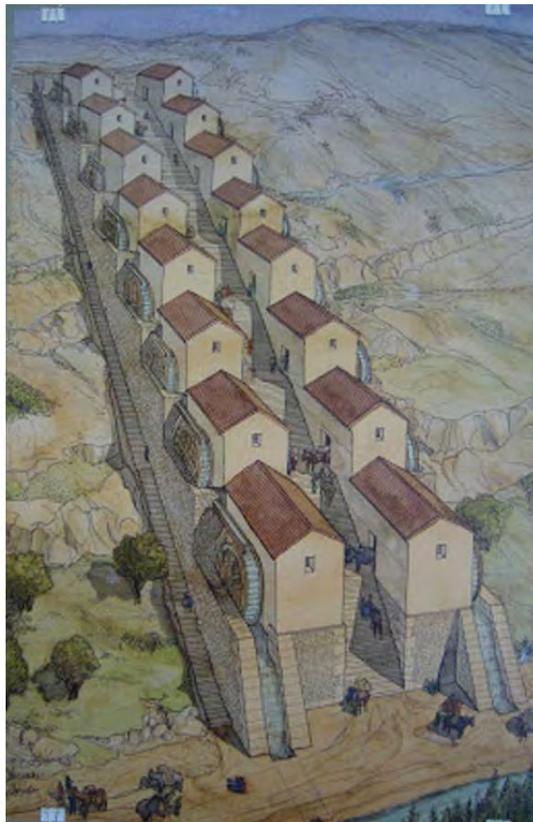
Moulin à axe vertical, Grecs, -200

## moulin à axe vertical



*Moulin à axe horizontal, Romains, -50*

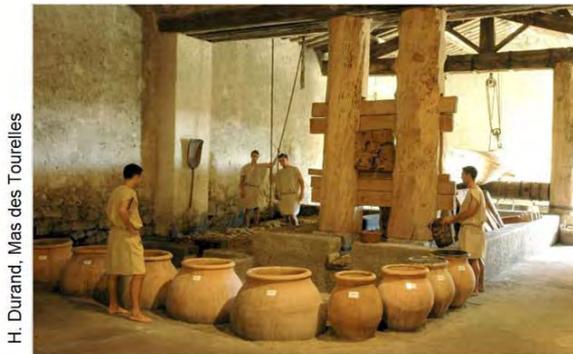
## **moulin à axe horizontal**



*Aqueducs et moulins de Bargebal, Arles, 11<sup>ème</sup>-13<sup>ème</sup> siècle*

## **meunerie d'Arles**

Une autre opération de traitement a également été mécanisée : le pressage, indispensable pour fabriquer de l'huile ou du vin. A partir de -500, la plupart des pressoirs étaient des **pressoirs à arbre**, dans lequel le poids d'une énorme poutre était utilisé pour presser les fruits. On a utilisé différents systèmes pour augmenter la force lors du pressage : le rajout d'une pierre, d'un treuil, ou d'une vis. Ces deux dernières méthodes apparurent chez les Grecs et les Romains. Au cours du I<sup>er</sup> siècle de notre ère, apparut chez les Grecs le premier **pressoir à vis centrale**, dans lequel l'action de la vis est directement utilisée pour le pressage (Amouretti, 1984).

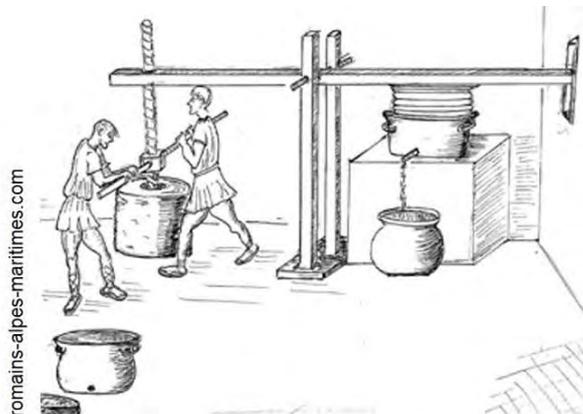


H. Durand, Mas des Tourelles

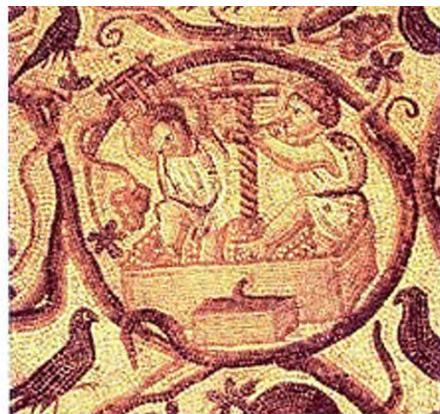


Pressoir à arbre avec treuil

### pressoirs à arbre



romains-alpes-maritimes.com



Musée du Louvre

(gauche) Pressoir à arbre avec vis, Romains, -100. (droite) Pressoir avec vis centrale, Liban, 575

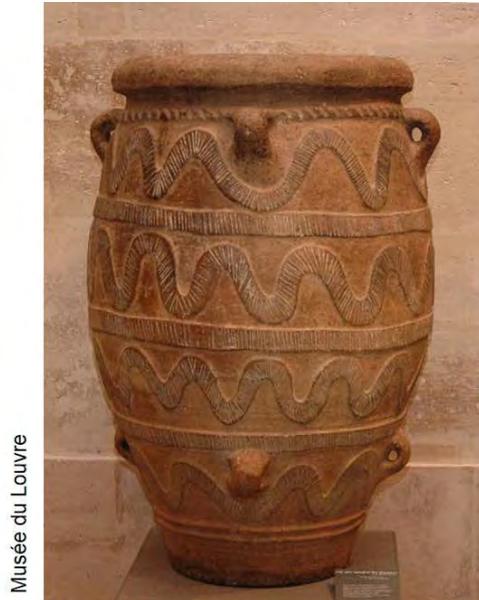
### pressoir à vis centrale

Enfin, la conservation des aliments, et en particulier des grains, était un problème crucial. Si les **poteries** étaient utilisées pour du stockage familial de courte durée, on stockait par contre les grosses réserves dans des **silos**<sup>16</sup> ou des **greniers**<sup>17</sup>. Concernant les autres aliments, diverses techniques étaient utilisées dans les différentes civilisations : séchage (poisson, par exemple), conservation

<sup>16</sup> Les silos sont des réserves souterraines de grains, dans lesquels ces derniers sont isolés au maximum de l'air afin de permettre une longue conservation.

<sup>17</sup> Les greniers sont des réserves à grain surélevées du sol, afin de les protéger des animaux et de l'humidité.

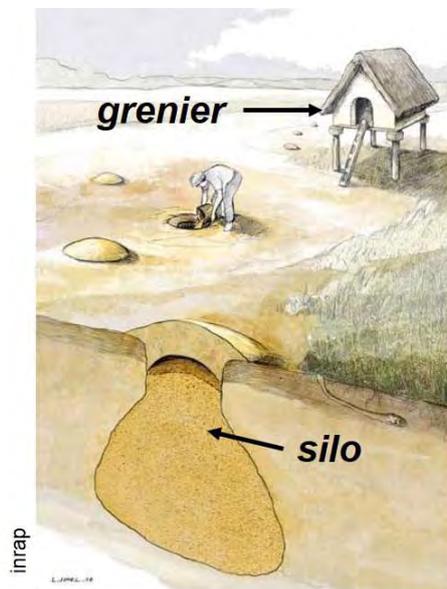
dans l'huile (pulpe de datte), salaison (charcuterie, fromage) ou lacto-fermentation<sup>18</sup>. Le lait pouvait également conservé longtemps sous forme de ghee<sup>19</sup> ou de beurre.



Musée du Louvre

*Poterie pour conservation des grains (Crète, -1500)*

## **poteries**



*Silos et greniers (Gaulois, -400)*

## **silos ou des greniers**

<sup>18</sup> La lacto-fermentation consiste à conserver les aliments à l'abri de l'oxygène (en les enterrant, en les gardant dans un contenant étanche, etc), induisant ainsi une fermentation anaérobie et la production d'acide lactique. C'est le mode de conservation de la choucroute.

<sup>19</sup> Le ghee, présent dans la civilisation indienne, est un beurre cuit et clarifié.

## B. L'eau

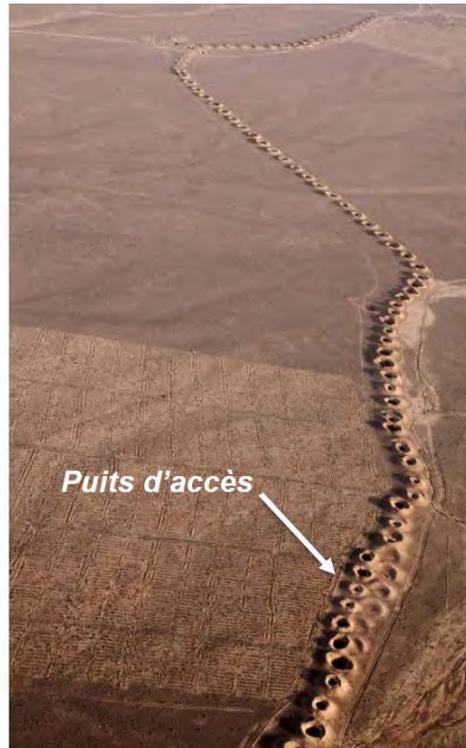
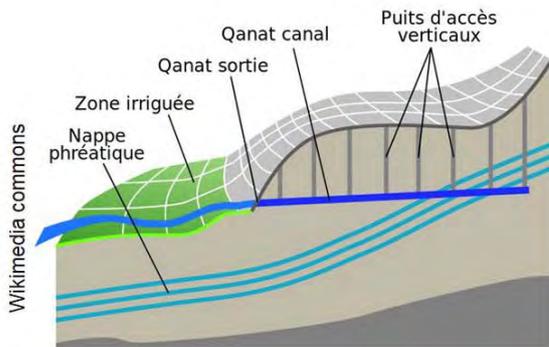
La nécessité d'amener de l'eau aux villages et aux champs a été un fort moteur d'évolutions technologiques (De Feo, 2013). Les premières sociétés agricoles se sont installées à proximité de fleuves subissant des crues, dont on a cherché à tirer le meilleur parti. Ainsi, en Mésopotamie, les crues étaient régulées et réparties par un système de canaux munis de vannes. Dans les zones sujettes à la mousson, la construction de digues était également nécessaire afin de retenir l'eau de cette dernière. Par ailleurs, dans de nombreuses civilisations antiques, des systèmes de canaux et réservoirs permettant de stocker l'eau de pluie ont été construits, et les premières maçonneries d'envergure ont été dictées par le choix d'alimenter les champs ou les villes en eau. C'est ainsi que, dans les régions comportant des sources d'eau potable éloignées, l'eau était amenée par l'intermédiaire d'**aqueducs**, dont les premiers apparurent au III<sup>ème</sup> millénaire en Mésopotamie et en Crète<sup>20</sup>, pouvant faire quelques kilomètres de long. Une autre possibilité d'alimentation en eau, appelée **qanat**, date du VII<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, et consiste à amener l'eau d'une nappe souterraine par l'intermédiaire de tunnels souterrains, jusqu'à un point de sortie à flanc de colline. On a trouvé des qanats faisant jusqu'à 50 km de long, avec des puits d'inspection pouvant atteindre 300 m de profondeur. A partir de -200, en Grèce, fut inventé le **siphon inversé**, permettant de traverser les vallées sans avoir à construire un aqueduc de grande hauteur. Dans ce système, l'eau descend au fond d'une vallée et la remonte dans des conduites, ce qui nécessite que ces dernières soient capables de supporter une forte pression. Les conduites en poterie ne répondent pas à cette contrainte, et les tuyaux des siphons étaient donc faits de pierre, de bronze ou de plomb. Les siphons inversés étaient monnaie courante dans l'Empire romain et, combinés à des aqueducs, permettaient de transporter l'eau sur une centaine de kilomètres. On estime que le nombre d'aqueducs à l'époque romaine était d'environ 800, pour une longueur cumulée de 5000 km.



(gauche) Carte des aqueducs romains. (droite) Pont de l'aqueduc de Ségovie (Espagne)

## aqueducs

<sup>20</sup> La civilisation minoenne s'est développée en Crète entre le III<sup>ème</sup> et le I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère.



(en haut à gauche) Principe du qanat. (en bas à gauche, et à droite) Qanat vu du ciel et de l'intérieur, Isfahan (Iran)

## qanat

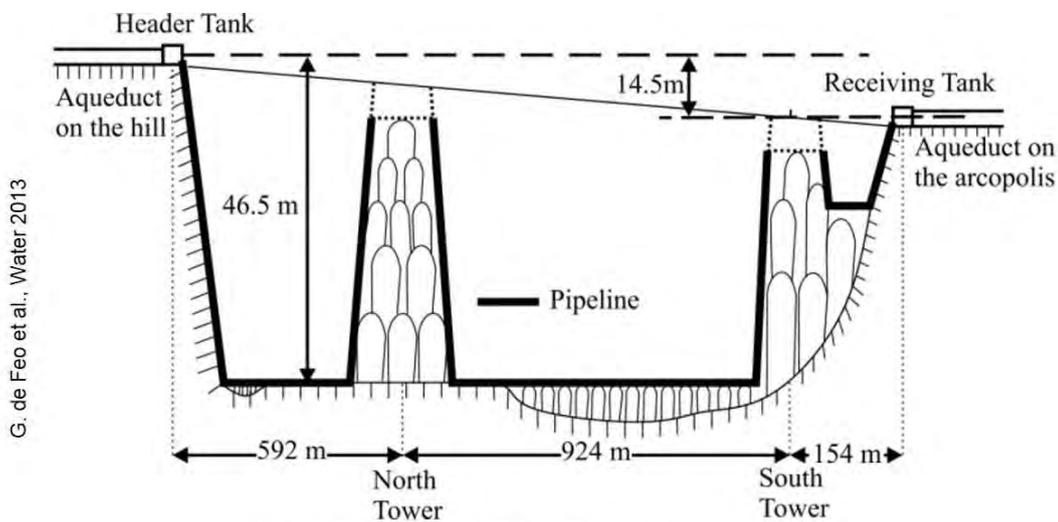


Schéma d'un siphon inversé romain

## siphon inversé

Lorsque l'eau provenait d'une rivière, d'un puits, ou lorsque que le dénivelé n'était pas suffisant entre la source et la ville, il était nécessaire d'élever l'eau. Différents systèmes permettaient cette élévation, le plus ancien d'entre eux étant originaire d'Egypte : appelé **chadouf**, il date du III<sup>ème</sup>

millénaire, et consiste en un récipient au bout d'une corde, elle-même accrochée à un balancier en bois. Dans le cas des **puits**, on utilisait également un seau tracté par une corde attachée à une poulie. A l'époque grecque, apparurent la **roue à godets** et la **chaîne à godets**, constituée d'une corde sans fin à laquelle sont accrochés des godets. Ce dernier système permet d'élever l'eau d'une hauteur importante. D'autres systèmes permettant une élévation en continue apparurent ensuite : la **pompe foulante à pistons**<sup>21</sup>, apparut chez les Grecs au III<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, et la **vis d'Archimède**, au III<sup>ème</sup> siècle avant notre ère.

Judith Crosher, Technology in  
The time of ancient Egypt



Chadouf (Egypte, -3000)

## chadouf

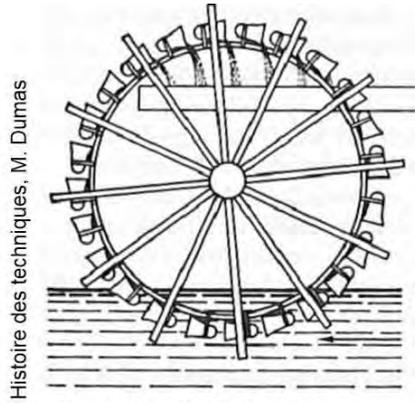
Puits gallo-romain, Villiers-le-Be



Puits gallo-romain et seau

## puits

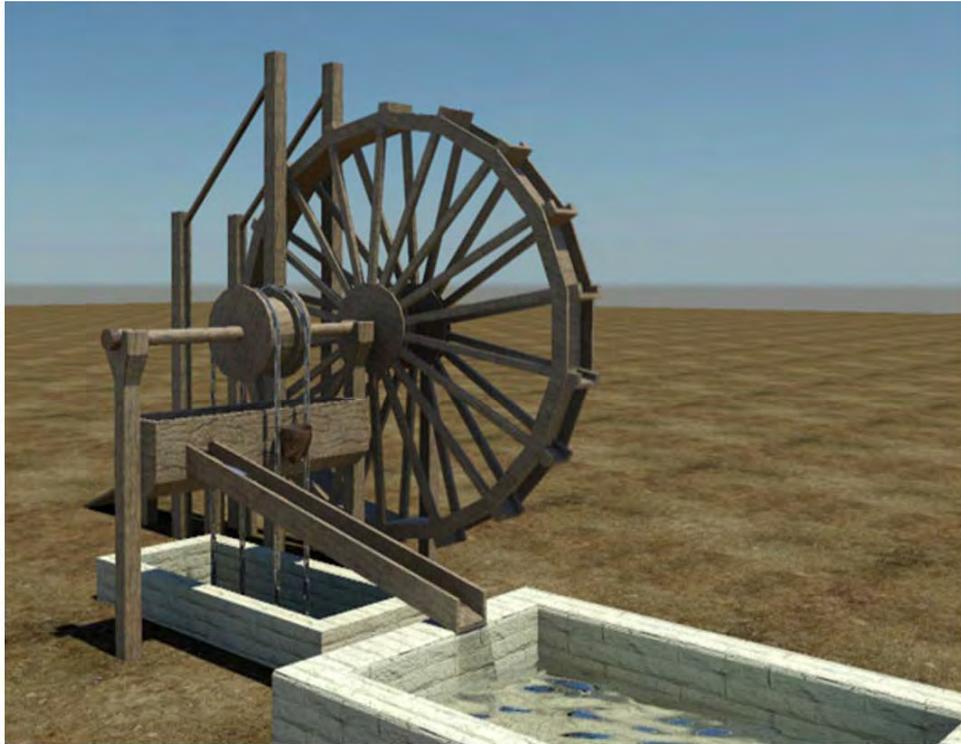
<sup>21</sup> Ce type de pompe à bras est muni de deux cylindres en bois, de deux pistons et d'un système de clapets anti-retour. La descente du bras aspire l'eau extérieure dans un cylindre et rejette l'eau du deuxième cylindre vers la sortie. La montée du bras rejette l'eau du premier cylindre et aspire l'eau extérieure dans le deuxième. A chaque montée ou descente du bras, il y a donc à la fois aspiration et refoulement.



Histoire des techniques, M. Dumas

Roue à godets (Grecs)

**roue à godets**



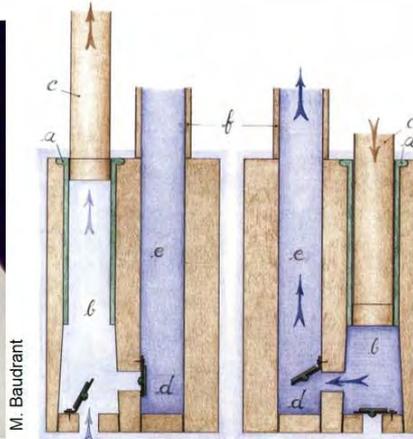
Réalisation Al. François, documentation Ph. Fleury

Chaine à godets (Grecs)

**chaine à godets**



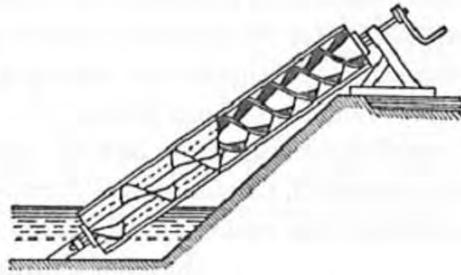
Luis Garcia



M. Baudrant

(gauche) Pompe hydraulique en fonte utilisée dans des mines (Romains, 1<sup>er</sup> Siècle).  
(droite) Schéma des pompes en bois romaines (11<sup>ème</sup> Siècle)

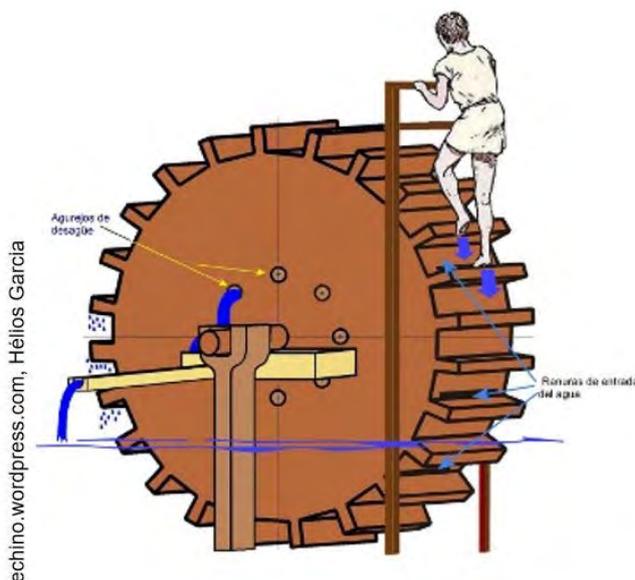
**pompe**



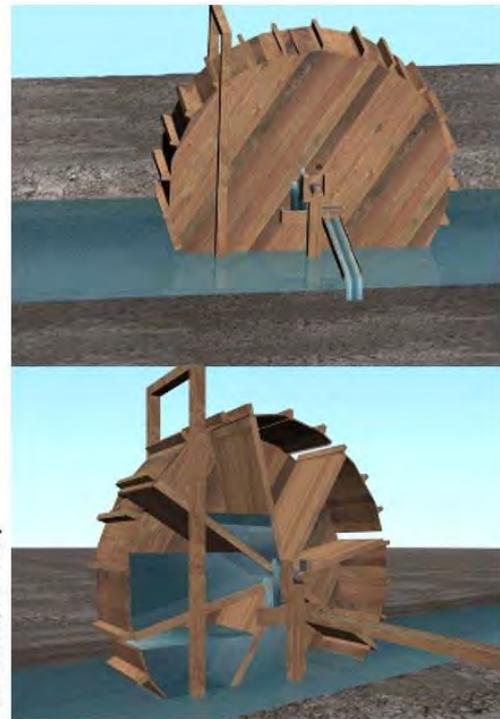
Vis d'Archimède (Grèce, IV<sup>ème</sup> Siècle)

## vis d'Archimède

Il faut apporter de l'énergie à tous ces systèmes pour fonctionner. Plusieurs méthodes ont été développées pour cela dans l'Antiquité : les pédales, la roue entraînée par la force hydraulique, le **tympan** ou le manège. Dans les deux derniers cas, des humains (souvent des esclaves) ou des animaux étaient utilisés pour l'entraînement. Mis à part le *chadouf* et les pompes à bras, qui étaient exclusivement manœuvrés par les humains, les autres systèmes ont tous été adaptés à un apport d'énergie animale ou hydraulique.



echino.wordpress.com, Hélios Garcia



unicaen.fr, P. Fleury

## tympan

(gauche) Tympan décrit par Vitruve, Italie, -50. (droite) Vue du tympan normale (haut) et en transparence (bas)

Certains couples « mécanisme d'élévation / méthode d'entraînement » ont été particulièrement utilisés et répandus, et sont connus sous des noms spécifiques. Ainsi, l'association d'un manège animal avec une roue ou une corde

à godets est appelée *saqia*, et est encore utilisée dans certaines régions rurales non alimentées en électricité. L'association d'une roue à aubes et d'une roue à godets en un même objet est appelée *noria*<sup>22</sup>. L'association d'un attelage de deux bœufs remontant et descendant un gros récipient (outre, seau) de plusieurs centaines de litres à l'aide d'une corde et d'une poulie est appelée *mohte* en Inde.

Dans les différentes civilisations, la distribution à l'intérieur des villes se faisait à l'aide de canalisations en pierre, en poterie, ou parfois en métal (plomb ou cuivre). Les canalisations étaient jointées à l'aide de plâtre<sup>23</sup>, mortier, anneaux métalliques ou soudures (Chalavoux, 1971 ; Cochet, 1993).



Jean-Claude Golvin

*Saqia en Egypte*

## saqia



wikimedia commons



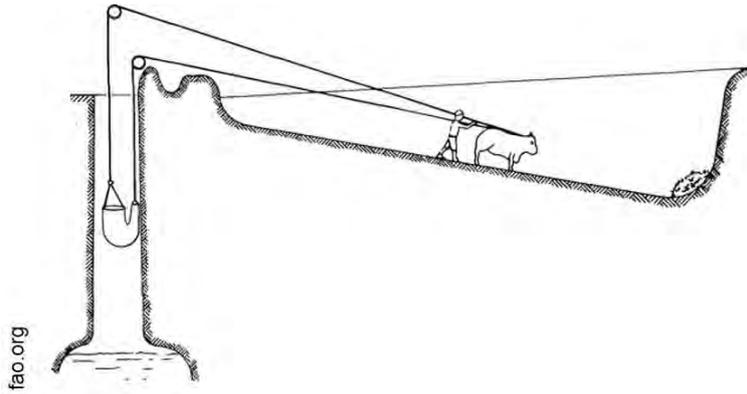
Jacques Seigne, Thierry Morin

(gauche) Détail des godets d'une noria. (droite) Reconstitution d'une noria du 1<sup>er</sup> Siècle, Tours

## noria

<sup>22</sup> Par extension, il semble courant d'appeler *noria* un grand nombre de systèmes destinés à élever l'eau.

<sup>23</sup> Le plâtre était produit par la déshydratation du gypse ( $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ), une roche. La déshydratation conduit à du sulfate de calcium partiellement déshydraté ( $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \frac{1}{2} (\text{H}_2\text{O})$ ) ou complètement déshydraté ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ ).



Mohte en Inde

**mohte**

### **C. Céramique et verrerie**

Le premier des « arts du feu » a été la céramique, les premières traces remontant à -25000, le tour apparaissant vers -4000. Les deux facteurs ayant poussé à son développement sont l'agriculture, qui a nécessité de nouveaux objets destinés à la conservation, et la sédentarisation, qui rendait plus facile la possession d'objets fragiles ou encombrants. Les **premières poteries** étaient cuites dans des **feux ouverts**. Pour cela, elles étaient empilées, recouvertes de combustible et cuites pendant quelques heures, à des températures qui n'excédaient pas 600°C. A ces températures, on obtient des objets qui peuvent être utilisés comme ustensiles de cuisson mais sont poreux. Cette porosité les empêche de conserver les liquides sur le long terme, mais permet néanmoins de conserver de l'eau fraîche, car l'eau suintante, en s'évaporant, rafraîchit le récipient. On peut imperméabiliser partiellement ces terres cuites en appliquant plusieurs couches d'engobe<sup>24</sup>, mais leur imperméabilisation parfaite nécessite de les glaçurer<sup>25</sup>, ce qui nécessite des températures de l'ordre de 1000°C. Les premières glaçures sur des céramiques apparaissent en Chine et en Mésopotamie au cours du II<sup>ème</sup> millénaire. Les températures requises étaient atteintes dans des fours plus complexes, comme le **four à coupole** : il est constitué d'un foyer bâti, recouvert d'une sole<sup>26</sup> percée sur laquelle sont posées les poteries. Ces dernières sont recouvertes d'une coupole dans laquelle est ouverte une petite cheminée. En Orient, les fours étaient plutôt horizontaux ou penchés, le foyer étant d'un côté du four, et la cheminée de l'autre. Différents types de fours furent développés pour la poterie, pouvant contenir un grand nombre de pièces. Ainsi,

<sup>24</sup> L'engobe est de l'argile diluée dans de l'eau, appliquée en fines couches sur la poterie.

<sup>25</sup> Glaçurer une céramique nécessite de déposer une fine couche de pâte composée de silice et de divers oxydes métalliques (pour les couleurs) à sa surface, avant de la recuire à plus de 1000°C. Cela conduit à former une fine couche de verre sur la poterie.

<sup>26</sup> La sole est la partie inférieure d'un four, sur laquelle on place les pièces à cuire ou chauffer.

chez les Romains, jusqu'à 30000 poteries pouvaient être cuites en une journée, dans des fours à étages. La maîtrise des **couleurs des céramiques** nécessitait un grand savoir-faire. En jouant sur les pigments métalliques recouvrant les céramiques, la température de cuisson, et la nature de l'atmosphère (réductrice ou oxydante) pendant la cuisson, les potiers arrivaient à un contrôle des couleurs finales de leurs céramiques. Les principaux composés utilisés comme pigments étaient des oxydes ou sulfates de fer, d'étain, de plomb, cuivre, cobalt ou manganèse.



*Reproduction d'une marmite et d'une jarre (néolithique)*

## **premières poteries**

La vie privée des hommes. Les temps préhistoriques, Hachette, 1993. P. Joubert

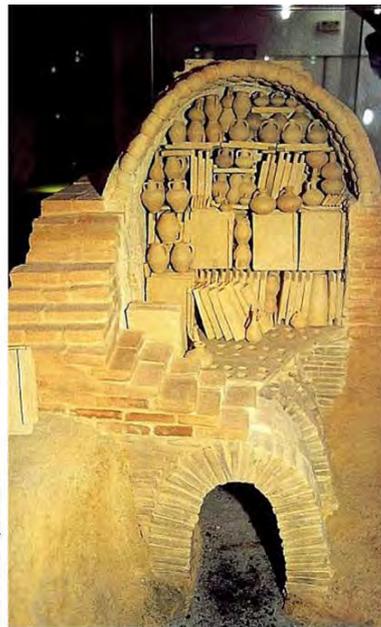


*Reconstitution d'une cuisson à feu ouvert de poterie*

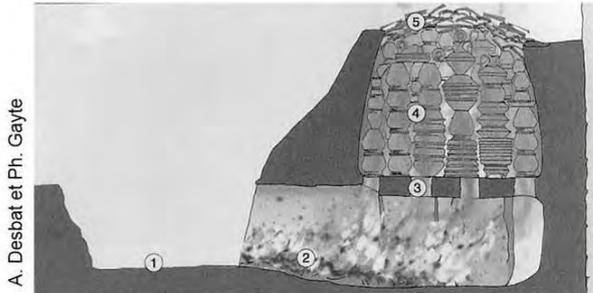
## **feux ouverts**



droits réservés



Musée amphoralis



A. Desbat et Ph. Gayfe

(en bas à gauche) Schéma d'un four à coupole enterré. (en haut à gauche) Représentation grecque d'un four à coupole sur une poterie. (droite) Reconstitution d'un four à coupole romain

## four à coupole



Cairo Egyptian Museum

National Museum of  
Natural History Washington



Musée du Louvre



Metropolitan  
Museum of art



Musée du Louvre



## couleurs des céramiques

Ce sont probablement les potiers qui ont découvert le verre, lors de leur fabrication de glaçures. Avant de poursuivre, il nous paraît utile de présenter quelques informations de base sur le verre (Slitine, 2005). Ce dernier est formé majoritairement de silice, que l'on trouve dans le sable, le quartz ou le silex. La silice devenant liquide à une température très élevée (1710°C), il est nécessaire de lui ajouter un matériau appelé fondant, afin d'abaisser son point de fusion. Deux fondants très courants sont la soude et la potasse, qui sont obtenues en rajoutant des cendres végétales à la silice (voir plus de détails à ce sujet dans la section « Chimie »). Dans l'Antiquité, un fondant très répandu était le **natron**<sup>27</sup>,

<sup>27</sup> Le natron est une roche basique (carbonate de sodium,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) qu'on peut récolter au bord de lacs asséchés. Le trona ( $\text{Na}_2(\text{CO}_3) \cdot \text{NaH}(\text{CO}_3) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), qui est trouvé dans les mêmes types de lieu peut également être utilisé pour les mêmes usages.

importé d’Egypte. Néanmoins, l’ajout de fondant fragilise le verre, et rend sa surface altérable par l’eau. Afin d’éviter cela, il est nécessaire que le mélange contienne une faible quantité d’un matériau appelé stabilisant. Deux stabilisants courants sont la chaux (CaO) ou la magnésie (MgO). Dans l’Antiquité, il semblerait que les stabilisants ait été parfois rajoutés de manière intentionnelle (coquillages ou craie), ou parfois présents dans certains sables utilisés ou dans les cendres végétales.



**natron**

*Natron au Tchad*

Les **premiers verres**, opaques, datent approximativement du III<sup>ème</sup> millénaire en Egypte. A cette époque, on leur rajoutait souvent des oxydes métalliques afin de les colorer. De premiers petits objets furent moulés mais, pour fabriquer des vases, plus grands et fins, on utilisa la technique dite de l’« **enduction sur noyau** » à partir de -1500. Elle consistait à fabriquer un moule en terre cuite de la forme du vase, et à l’enduire progressivement de verre. Le moule initial était ensuite brisé et retiré du vase. Jusqu’à l’invention de la canne à souffler le verre, chez les Romains en -100, le verre était un produit rare et extrêmement luxueux. Après cette invention, l’artisanat du verre prit de l’ampleur, notamment lorsque l’utilisation de températures suffisamment élevées (1100°C) permit de fabriquer de grosses pièces. A partir du I<sup>er</sup> siècle, les Romains se mirent à souffler du verre à l’intérieur de **moules**, ce qui permettait la production « en série » de récipients de forme et taille standardisées, dont des récipients à section carrée, et donc adaptés au transport. A la même époque, les verriers fabriquèrent les premières **vitres** en coulant le verre fondu sur des plaques en fer, pierre ou bois mouillé recouvertes de sable. Au III<sup>ème</sup> et IV<sup>ème</sup> siècle, c’est en découpant à chaud un cylindre de verre soufflé que furent fabriquées des vitres aux deux faces lisses. Des miroirs sur métal, fabriqués en coulant du plomb en fusion sur un disque de verre, datent également de cette époque.

A. Mikkelsen, National  
Museum of Denmark



British museum



(gauche) Objet en verre (Egypte, -3400). (droite) Vase  
en verre de 12 cm (Mésopotamie, -1300)

## premiers verres

M. Cyron, Antikensammlung Museum Berlin



## enduction sur noyau

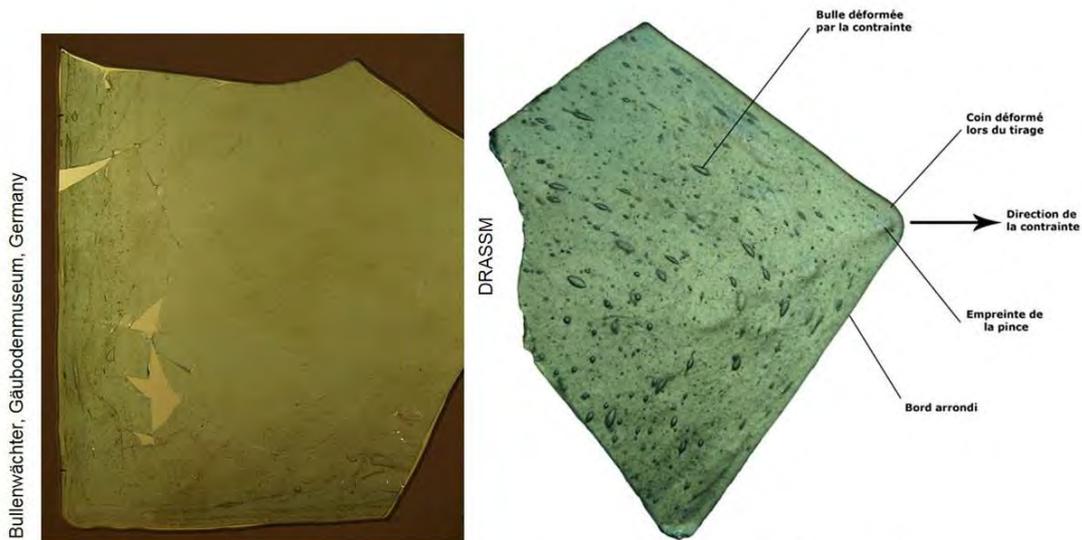
Vase grec fabriqué par  
enduction sur noyau

Musée Rolin



Vases romains (I<sup>er</sup>-IV<sup>ème</sup> siècle)

## moules



(gauche) Verre à vitre romain issu d'un château en Allemagne (I<sup>er</sup>-IV<sup>ème</sup> siècle).  
 (droite) Verre à vitre romain issu d'une épave (III<sup>ème</sup> siècle)

## vitres

Enfin, pour obtenir du **grès**<sup>28</sup> ou de la **porcelaine**<sup>29</sup>, des températures très élevées sont nécessaires (1200-1300°C). L'obtention de telles températures n'est possible que dans des fours à soufflets. Les premières poteries en grès apparaissent en Chine lors du I<sup>er</sup> millénaire, et leur production augmenta à partir de -200. L'utilisation de kaolin<sup>30</sup> combinée à ces hautes températures permit l'apparition des premières porcelaines vers le III<sup>ème</sup> siècle.



Grès chinois, I<sup>er</sup> siècle

## grès

<sup>28</sup> Le grès est composé d'une argile qui a été vitrifiée dans toute l'épaisseur de la pâte, rendant la céramique non-poreuse.

<sup>29</sup> La porcelaine est une céramique blanche, vitrifiée, et partiellement transparente. Elle est fabriquée à partir d'une argile blanche, le kaolin.

<sup>30</sup> Le kaolin est une argile blanche à la base de la porcelaine.



(gauche) Proto-porcelaine chinoise 1<sup>er</sup> siècle. (droite) Porcelaine chinoise, VII-X<sup>ème</sup> siècle

## porcelaine

### D. Extraction minière et métallurgie

Le troisième art du feu est la métallurgie, apparue aux environs de -3000 dans le Proche-Orient. Il n'est pas inutile de rappeler quelques principes de bases de métallurgie. Tout d'abord, à part l'or, la grande majorité des métaux sont présents dans des minerais sous formes d'oxydes ou de composés soufrés. Par exemple, le fer peut être trouvé, entre autres, sous forme de maghémite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ou pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). Le procédé technique qui consiste à transformer un oxyde en métal est appelé réduction. Il nécessite de faire réagir l'oxyde avec un autre composé qui va lui, s'oxyder. Ce composé est la plupart du temps le monoxyde de carbone  $\text{CO}$ , issu de la combustion d'un matériau, généralement le charbon de bois, dans une atmosphère pauvre en oxygène. Un transfert d'oxygène a lieu entre le composé métallique et le  $\text{CO}$ , suivant par exemple l'équation :  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 2\text{Fe}$ . Lorsqu'on part d'un minerai soufré, une étape intermédiaire supplémentaire est nécessaire, appelée grillage. Cette dernière consiste à brûler le minerai dans un feu ouvert, libérant alors principalement du soufre sous forme de  $\text{SO}_2$ , suivant par exemple l'équation  $2\text{FeS}_2 + 11/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2$ . Il reste ensuite à réduire l'oxyde métallique pour obtenir le métal.

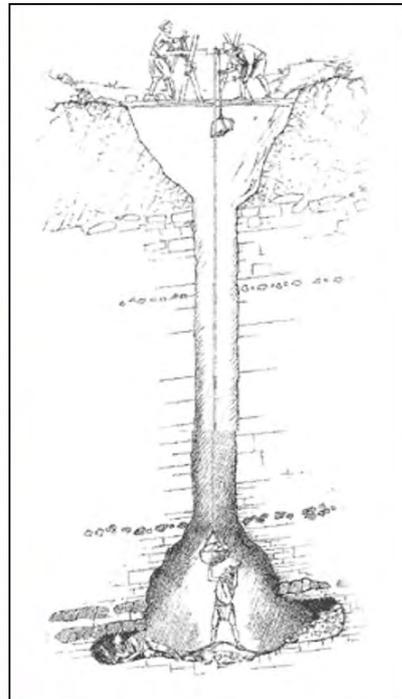
L'extraction minière a commencé il y a plusieurs dizaines de millénaires par la recherche de pierres adaptées à la fabrication d'outils –dont la plus célèbre est sans doute le **silic**– mais également d'**ocre**<sup>31</sup>, qui était utilisée pour la peinture murale et corporelle. Ce n'est que lorsque les différentes civilisations sont entrées dans l'âge de bronze ou de fer que les métaux ont été recherchés. Les roches étaient extraites à l'aide de **masses** ou **pics** en pierre, en os ou en bois d'animaux puis, à l'époque gréco-romaine, en fer. Quand la mine pouvait être suffisamment aérée, on pouvait également chauffer la roche à l'aide d'un feu, puis la refroidir brusquement avec de l'eau, afin de créer des fissures et la

<sup>31</sup> L'ocre est un terme générique qui désigne différents oxyde de fer de couleur (jaune, orange, rouge).

fragiliser. Les minerais étaient extraits de gisements de surface lorsque cela était possible, ou de galeries souterraines. Dès le V<sup>ème</sup> millénaire, on retrouve la trace de galeries de 15 à 20 m de profondeur en Serbie, pour l'extraction du cuivre. Les filons de **quartz aurifère** en Egypte atteignaient, eux, une centaine de mètres de profondeur pour deux mètres de hauteur (Meyer, 1997). Il s'agissait de galeries partant en biais depuis la surface, soutenues en laissant des piliers de roches au milieu des galeries. Dans les **mines grecques**, des puits verticaux, pouvant atteindre 120 m de profondeur, alimentaient un petit réseau de galeries permettant l'extraction et l'aération. A cette époque, les galeries étaient également soutenues à l'aide d'étais en bois. Dans l'empire romain, des puits descendant jusqu'à 340 m de profondeur furent creusés (Domergue, 2016).



minesdespiennes.org

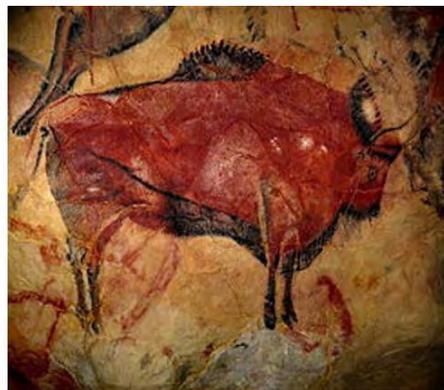


**silex**

(gauche) Site d'extraction du silex à Spiennes (Belgique, -4000), contenant des milliers de puits. Les puits font typiquement 15 m et les galeries entre 5 et 7 m. (droite) Reconstitution.



wikimedia, Marco Almbauer



wikimedia

**ocre**

(gauche) Trois sortes d'ocre. (droite) Peinture rupestre, Espagne, -15000

paundurlic.com



**masses**

*Maillets en pierre, issus d'une mine de cuivre dotées de galeries de 15-20 m (Rudna Glava, Serbie, -5000)*

Science Museum



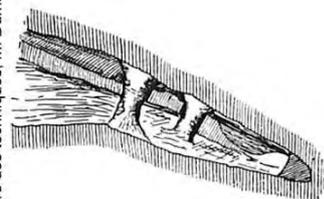
**pics**

*Pic en bois de renne, (Angleterre, -3000)*

C. Meyer, J. of Minerals, 1997



Histoire des techniques, M. Dumas



*(gauche et milieu) Site de Bir Umm Fawakhir (Egypte, V<sup>ème</sup> Siècle). (droite) Schéma d'une galerie.*

**quartz aurifère**



Ghent university



Ghent university

(haut) Puits principal et galerie d'un complexe minier en Grèce.  
(bas) Esclaves travaillant dans une mine (Grèce, -500)



les Mines antiques du Laurion, PEMF, 2005

## mines grecques

Dans les mines d'or romaines à ciel ouvert du Nord-Ouest de l'Espagne, des procédés techniques assez spectaculaires furent utilisés (Domergue, 1986). Ils nécessitaient d'amener de grandes quantités d'eau sur les sites miniers, de la stocker dans des réservoirs, et de l'utiliser pour abattre des pans de montagnes, éroder les roches et évacuer les stériles<sup>32</sup> du site. Pour donner une idée de l'ampleur de ces chantiers, on peut citer quelques chiffres concernant le site de Las Medulas, qui fut exploité pendant environ 250 ans : le site comprenait plusieurs dizaines de milliers de travailleurs ; son réservoir principal contenait plus de 10 000 m<sup>3</sup> d'eau ; 500 millions de m<sup>3</sup> de terre furent déplacés ; environ 1500 tonnes d'or furent extraits.

Dans l'extraction minière plus classique, le problème de l'exhaure<sup>33</sup> est crucial. Pendant la période gréco-romaine, de nombreuses méthodes furent utilisées : usage de seaux, de pompes foulantes, de vis d'Archimède ou de roues à augets. Une autre, bien plus efficace lorsqu'elle était possible, consistait à creuser une galerie transverse qui débouchait vers l'extérieur et permettait d'évacuer l'eau. Cela nécessitait parfois de creuser horizontalement sur plus d'un kilomètre (Domergue, 2016).

On peut également noter que des techniques similaires à celles utilisées pour l'extraction de minerais étaient utilisées pour l'extraction de sel gemme<sup>34</sup> et de saumure<sup>35</sup>, cette dernière étant par la suite évaporée. Enfin, mentionnons également que la Chine disposait de mines de **charbon**, puisqu'elle fut la première civilisation à avoir un recours massif à cette ressource dès le IV<sup>ème</sup>

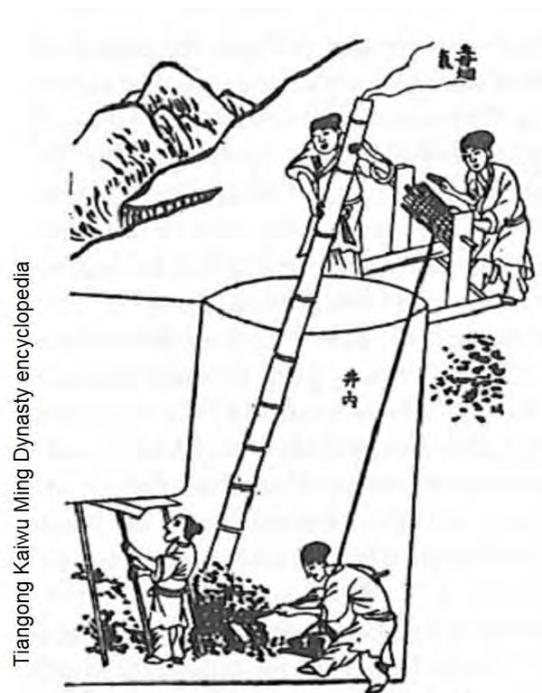
<sup>32</sup> Le stérile est la roche « inutile », qui ne contient pas le métal recherché.

<sup>33</sup> L'exhaure est l'évacuation des eaux souterraines des mines.

<sup>34</sup> Le sel gemme est du sel cristallisé qu'on trouve dans des filons souterrains.

<sup>35</sup> La saumure est de l'eau salée, qui est également présente dans les mines de sels.

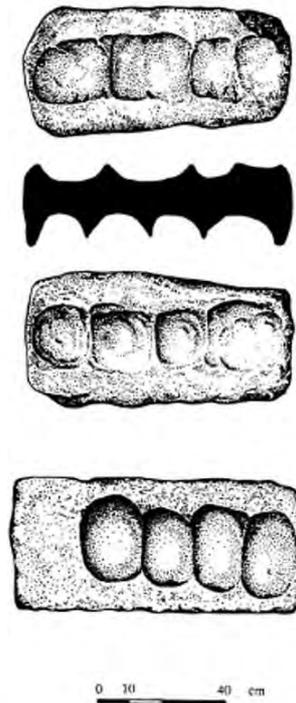
siècle. Le gaz naturel y était également exploité, et extrait des mines à l'aide de conduites en bambou ou en poterie. Les propriétés du charbon étaient également connues des Grecs, mais il semble que son exploitation dans l'Antiquité n'ait été significative qu'en Grande-Bretagne au temps des Romains, et qu'elle décrivit par la suite.



*Mine de charbon et évacuation  
des gaz toxiques*

## **charbon**

Le minerai, une fois extrait, doit être broyé et purifié afin de ne garder que du minerai riche en métal (Domergue, 2016). L'opération de broyage s'effectuait principalement à l'aide de meules manuelles, mais il semblerait que des **pilons hydrauliques**, probablement similaires à ceux qui furent utilisés plus tard au Moyen Âge (voir le Chapitre III), étaient utilisés par les Romains (Wilson, 2002). Une fois un broyage grossier effectué, un pré-tri par inspection visuelle du minerai obtenu peut être suffisant dans le cas d'un minerai riche en métal. Pour du minerai pauvre, il faut concentrer plus fortement le métal. Les méthodes pour cette dernière opération sont toutes basées sur le fait que le métal est plus dense que la roche. Il faut dans un premier temps broyer le minerai jusqu'à obtenir de la poudre, et ensuite séparer les particules les plus denses des autres. Pour cela, on peut mettre en suspension les particules dans de l'eau et les laisser retomber dans un récipient, les plus denses tombant au fond. On peut également faire couler une suspension de cette poudre le long d'une peau d'animal, d'un plan incliné ou d'un canal, les particules les plus denses se redéposant en premier. L'opération de réduction de la poudre de minerai dans un four vient conclure ces opérations.



*Enclumes de pierre romaines destinées au broyage des minerais, indiquant l'utilisation probable de pilons hydrauliques*

## **pilons hydrauliques**

Revenons maintenant aux métaux et à leur utilisation. Dans certaines régions, l'utilisation du cuivre ou de l'or natif<sup>36</sup> a précédé celles de métaux obtenus par réduction de leur oxyde. On trouve ainsi des traces de leur utilisation remontant à -8000 pour le cuivre et -4600 pour l'or. Le cuivre fut le premier métal à avoir permis de fabriquer des outils, par exemple chez les Egyptiens, mais il présente deux inconvénients : c'est un matériau malléable et son point de fusion élevé (1085°C) rend son façonnage par moulage difficile. Même lorsque cette opération est réussie, l'absorption de gaz par le cuivre pendant le moulage le rend ensuite poreux. En dépit de ces propriétés a priori peu favorables, plusieurs sociétés ont développé le savoir-faire permettant de durcir par martelage le cuivre, permettant ainsi de fabriquer des outils, et pas seulement des objets d'ornementation. Par exemple, des chasseurs-cueilleurs vivant en Amérique du Nord entre -4000 et -1000 fabriquaient de nombreux **objets en cuivre** natif : pointes de lance, couteaux, lames, poinçons, perforateurs, ciseaux, coins, haches, harpons, hameçons, aiguilles, gorges, ornements, bracelets, pendentifs, bagues et perles. C'est également le cas de certains Inuits qui fabriquaient des objets en cuivre natif il y a plus de 3000 ans (Routhier, 1999; Ehrhardt, 2009).

<sup>36</sup> Le métal natif est présent à l'état non oxydé dans la roche.

Milwaukee Public Museum, Milwaukee, Wisconsin.  
Photograph by Kathleen L. Ehrhardt



*Objets en cuivre retrouvés dans différentes localités du Wisconsin, provenant de groupes de chasseurs-cueilleurs ayant vécu entre -4000 et -1000.*

## objets en cuivre

Le **bronze** est un alliage d'étain (entre 3 et 30%) et de cuivre, apparu avant ou après le cuivre suivant les régions, et dont la dureté est environ deux fois supérieure à celle du cuivre. Son point de fusion plus faible (750°C pour 30% d'étain) en fait un métal plus facile à travailler que le cuivre et facilite le moulage. A cet effet, les moules furent d'abord fabriqués en argile, puis en pierre ou en grès. Très rapidement, la facilité à couler le bronze a permis à différentes civilisations de fabriquer des objets monumentaux : une statue de 1750 kg a été fondue chez les Mésopotamiens vers -1300, et des chaudrons de plus de 800 kg étaient fondus vers la même période en Chine. Pour couler des objets d'art, avec des détails fins, et réalisés en un seul exemplaire, on utilisait le moulage à la cire perdue<sup>37</sup>, encore utilisé de nos jours, et qui permet d'obtenir des pièces en métal creuses.

---

<sup>37</sup> Le moulage à la cire perdue consiste à faire une ébauche grossière en argile de la pièce à réaliser, à la recouvrir d'une couche de cire sur laquelle on sculpte les détails, et à enrober le tout dans un moule d'argile tout en ménageant des orifices permettant la coulée ultérieure du métal. Après avoir cuit le moule et fait fondre la cire, on verse le métal fondu par les orifices, qui vient se placer à l'endroit où se trouvait auparavant la cire.



(gauche) Statue de la reine Napir-Asou, 1750 kg (Iran, - 1300). (milieu) Chaudron en bronze (Chine, -1100). (droite) Chaudron en bronze, 875 kg (Chine, -1200)

## bronze

L'étain nécessaire à la fabrication du bronze est un matériau difficile à extraire de sa gangue de quartz et relativement rare (Routhier, 1999). Il fut donc l'objet d'un des plus vieux commerces à longue distance du monde, puisque des routes commerciales de plusieurs milliers de km remontant au III<sup>ème</sup> millénaire ont été mises en évidence. Il fut également à l'origine de conflits.

Le **fer** est un matériau de choix dans la métallurgie, du fait de sa densité inférieure et sa dureté bien supérieure à celle du bronze, de son abondance dans la croûte terrestre, et de sa bonne répartition spatiale sur notre planète. On peut tout d'abord noter que certaines civilisations, dès le V<sup>ème</sup> millénaire, ont utilisé du fer météorique<sup>38</sup> avant de maîtriser la métallurgie, même si les quantités disponibles étaient faibles. Suivant les civilisations, l'extraction du fer à partir du minerai est apparue avant le bronze (-2700 en Afrique), après (-1100 au Proche-Orient) ou pas du tout (Amérique précolombienne).

	Fer pur	Acier	Fonte
Taux de carbone augmente	0%	0.02-2%	2-6.5%
Température de fusion diminue	1500°C		1150°C
Dureté augmente	mou		très dure et cassante

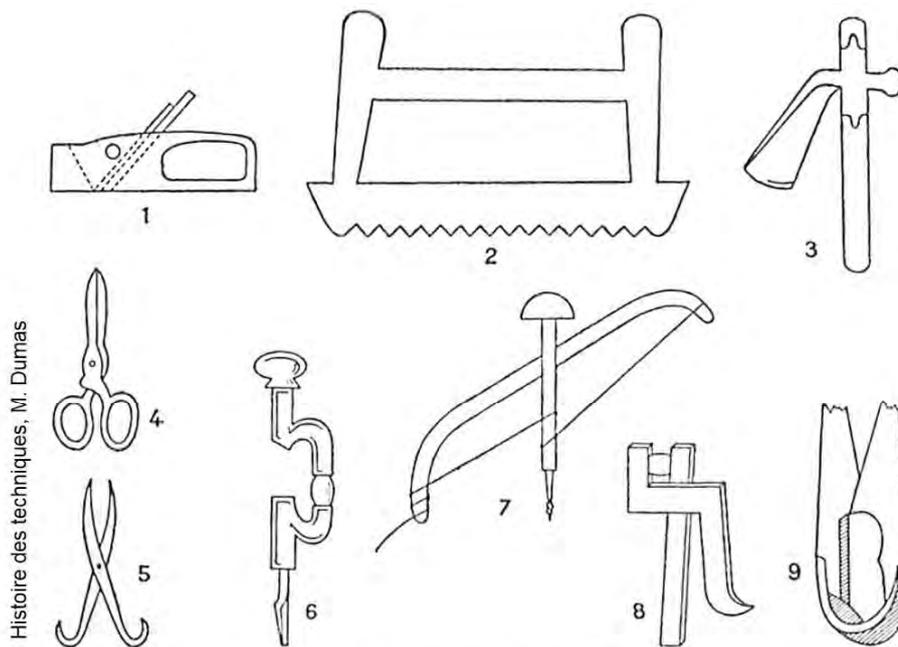


(haut) Tableau récapitulatif des caractéristiques du fer, de l'acier, et la fonte.  
(en bas à gauche) Outils de forgeron (République Tchèque, -500). (en bas à droite) Objets d'une tombe (Turquie, -700)

## fer

<sup>38</sup> Le fer peut être trouvé à l'état natif dans les météorites. On arrive à le distinguer du fer terrestre par sa teneur bien plus élevée en nickel.

Avant de poursuivre sur la métallurgie du fer, nous allons fournir quelques informations sur les différents types de fer et leur méthode de fabrication. La teneur en carbone est le principal facteur permettant de discriminer les différents types de fer. Ainsi, ce qu'on appelle simplement « le fer » est un fer relativement pur, ayant un point de fusion très élevé (1500°C). L'acier est un fer de teneur plus élevée en carbone, mais inférieure à 2%. Enfin, la fonte a une teneur en carbone dans la gamme 2-6%. Grossièrement, lorsque la teneur en carbone augmente, la température de fusion décroît (le minimum est à 1150°C) et la dureté augmente. Ainsi, on peut fabriquer des aciers « durs » ou « doux » en jouant sur leur teneur en carbone. Enfin, la fonte est un matériau extrêmement dur mais cassant, et donc peu adapté à la fabrication de lames tranchantes (soc, armes) ou aux différents usages dans lesquels une certaine souplesse du métal est recherchée. Ces différentes considérations expliquent que l'acier soit en définitive pour de nombreux usages la forme la plus recherchée, le fer étant trop mou, et la fonte trop cassante. Les premiers objets élaborés en fer non-météorique furent des armes et des outils : pioches, herminettes, socs d'aires, et scies étaient ainsi fabriqués par les Mésopotamiens. Chez **les Romains**, en plus des armes, on fabriquait également clous, clés, couteaux, vilebrequins, rabots, truelles, vrilles, emporte-pièces, ustensiles de cuisine, etc.



1, Rabot, Pompéi ; 2, Scie, Rome ; 3, Herminette à marteau (*ascia*), Gaule ; 4, Ciseaux, Ronsden (1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C.) ; 5, Ciseaux, Priène ; 6, Vilebrequin (peinture), Naples ; 7, Tarière, Thèbes (Égypte) ; 8, Emporte-pièce (bas-relief), Autun ; 9, Forces à lame interchangeable, Pompéi.

#### Outils romains

### les Romains

Les premiers fours employés pour la métallurgie étaient des **bas-fourneaux**<sup>39</sup>, alimentés en **charbon de bois**, qui permettaient d'atteindre la température à laquelle l'oxyde de fer se réduit (environ 800°C), mais pas celle à laquelle il fond. Le charbon de bois était fabriqué en faisant brûler un tas de buches recouvertes de terre, ce qui permet de n'effectuer qu'une combustion partielle du bois. Les bas-fourneaux, afin que l'atmosphère dans le four soit pauvre en oxygène, étaient surmontés d'un dôme en argile obturant leur sommet, qui était détruit à la fin de l'opération. A la fin du procédé, on obtient à l'intérieur du bas-fourneau une **loupe**<sup>40</sup>, qui doit être travaillée par **cinglage**<sup>41</sup> afin de lui enlever ses **scories**<sup>42</sup> et d'homogénéiser le métal. Des **lingots** sont enfin formés, et conservés pour un usage ultérieur. En augmentant la température (environ 1200°C) on augmente le rendement de la réaction et donc la quantité de fer produite ; on permet également à certaines scories de devenir liquide et de s'écouler hors du four, ce qui améliore la qualité de la loupe (Thiele, 2013).

w3.utah.univ-tlse2.fr/fer/, P.-M. Decombeix, J.-M. Fabre et C. Rico



Reconstitution d'un site de métallurgie dans la montagne noire (-100→+300). (gauche) Le bas fourneau. (droite) Les soufflets permettant d'attiser le foyer.

## bas-fourneaux

<sup>39</sup> La notion de bas-fourneaux n'est apparue qu'après l'apparition des premiers haut-fourneaux. La distinction entre les deux n'est pas basée sur leur hauteur mais sur la température atteinte et le matériau produit : fer dans le bas-fourneau et fonte dans le haut-fourneau.

<sup>40</sup> La loupe contient le métal réduit, de composition peu homogène, mais également des scories, impuretés composées de cendres du combustible employé et de restes de minerai.

<sup>41</sup> Le cinglage, ou martelage, consiste à frapper la loupe à chaud de manière à homogénéiser le métal et lui ôter ses scories.

<sup>42</sup> Les scories, qu'on appelle également « le laitier », sont composées de divers oxydes : principalement de la silice (SiO<sub>2</sub>), mais également de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de la chaux (CaO), de la magnésie (MgO), et des oxydes de fer (Mahé-Le Carlier, 1998).

w3.utah.univ-tlse2.fr/fer/, P.-M.  
Decombeix, J.-M. Fabre et C. Rico



Reconstitution d'un site de métallurgie dans la montagne noire (-100→+300). Etapes de fabrication du charbon de bois.

## charbon de bois

docroger.over-blog.com



w3.utah.univ-tlse2.fr/fer/, P.-M.  
Decombeix, J.-M. Fabre et C. Rico



(gauche) Extraction de la loupe de fer. (droite) Loupe de fer

## loupe

Morgan Riley



Cinglage à la sortie du bas-fourneau

## cinglage

w3.utah.univ-tlse2.fr/fer/, P.-M.  
Decombeix, J.-M. Fabre et C. Rico



## scories

Coulée de scories

traces.univ-tlse2.fr

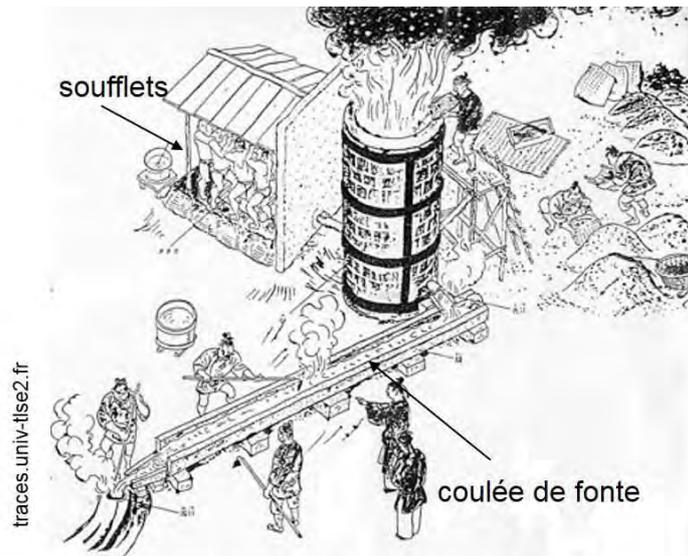


## lingots

Lingots de fer, époque gallo-romaine

Dans un **haut-fourneau**, la température est supérieure à 1500°C, de telle sorte que le fer rentre en fusion. Le fer liquide réagit avec le monoxyde de carbone dégagé par le combustible et s'enrichit en carbone, conduisant à la production de **fonte**. Cette dernière, liquide, s'écoule hors du four, ce qui permet de fabriquer des pièces moulées. Une température aussi élevée ne peut être atteinte que si les fourneaux sont munis d'un système d'injection d'air. Les Chinois, dès -400, utilisaient des hauts-fourneaux dotés de **soufflets** à double-effet<sup>43</sup> gigantesques, actionnés par plusieurs centaines de personnes ! Ces soufflets furent dès le I<sup>er</sup> siècle actionnés par la force hydraulique.

<sup>43</sup> Un soufflet à double-effet souffle de l'air quand le piston monte et quand il descend.



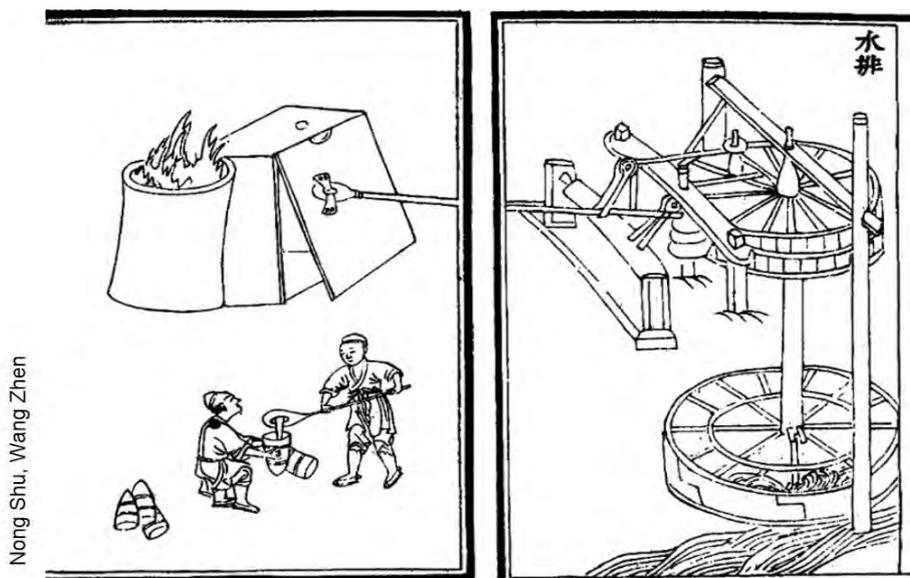
**haut-fourneau**

Illustration d'un haut-fourneau chinois



**fonte**

Chaudron en fonte, -400



Nong Shu, Wang Zhen

Illustration du procédé antique permettant d'actionner les soufflets dans les haut-fournaux chinois, extraite d'un traité du XIV<sup>ème</sup> Siècle.

**soufflets**

Quel que soit le procédé utilisé, on constate que pour obtenir de l'acier, il faut soit carburer<sup>44</sup> le fer, soit décarburer<sup>44</sup> la fonte. Concernant le premier procédé, en Inde, on chauffait le fer avec des copeaux et des feuilles de plantes, donnant lieu à un acier de grande qualité (le Wootz) qui fit l'objet de commerce dès le I<sup>er</sup> siècle. Les Chinois pratiquaient la décarburation mais également la cofusion de fonte et de fer pour former de l'acier. Les premiers aciers obtenus par les Romains, par contre, semblent être plutôt le fait d'un minerai d'exception plutôt que d'un travail de métallurgie proprement dit. Quant aux Grecs, ils maîtrisaient la fabrication d'un acier par cémentation<sup>45</sup> en faisant brûler du charbon de bois avec de fines feuilles de fer, le carbone dégagé par la combustion transformant le fer en acier.

Un autre métal relativement abondant dans la croûte terrestre est le zinc. L'absence de production ancienne du zinc métallique, s'explique par le fait qu'il s'évapore aux alentours de 900°C, alors que la réduction de son oxyde nécessite des températures plus élevées. Il s'évapore donc aussitôt formé ! Ce n'est qu'au XII<sup>ème</sup> siècle, en Inde, qu'un procédé permettant de condenser les vapeurs de zinc fut développé. Pour fabriquer le **laiton**, alliage de cuivre et de zinc, on utilisait une technique de cémentation, en opérant aux environs 900°C la réduction du carbonate de zinc en présence de cuivre, entraînant la formation de laiton à la surface du cuivre. Le laiton, qui est sans doute le fameux « orichalque » des Anciens, était un métal considéré comme précieux car son éclat se rapprochait de celui de l'or. Il fut notamment utilisé à une certaine époque par les Romains pour leur monnaie (Halleux, 1973).



Classical Numismatic Group, Inc. cngcoins.com

## laiton

*Pièces romaines en laiton, 40*

Dès -300, les Grecs savaient fabriquer du mercure à partir du **cinabre**<sup>46</sup>, en condensant les vapeurs qui se forment lors de son évaporation. Le mercure était principalement utilisé pour la purification de l'or, puisqu'il s'allie à l'or

<sup>44</sup> Carburer consiste à enrichir en carbone un matériau, et décarburer l'appauvrir.

<sup>45</sup> La cémentation consiste à enrichir en carbone la surface d'un objet de fer ou d'acier. Dans le procédé utilisé par les Grecs, le fait d'utiliser de fines feuilles de fer permet de carburer la totalité du fer. Par extension, la cémentation désigne également tout traitement métallurgique dans lequel la nature de la surface d'un métal est modifiée par les vapeurs d'un autre matériau.

<sup>46</sup> Le cinabre est un minerai de formule HgS (sulfure de mercure).

mais pas aux autres métaux. Ainsi, pour purifier un alliage or/argent, on rajoute du mercure, on sépare ensuite l'**alliage or-mercure** qui s'est formé, puis on évapore le mercure.



Géry Parent

*Cinabre et gouttelettes de mercure natif  
(mines d'Almaden, Espagne)*

## **cinabre**



Viviane Terron (WWF)

*Amalgame or-mercure*

## **alliage or-mercure**

L'argent et le **plomb** se retrouvent généralement tous deux au sein du même minerai. Après réduction du minerai, on obtient un mélange d'argent et de plomb, le plomb argentifère. La coupellation<sup>47</sup>, une technique qui date probablement du II<sup>ème</sup> millénaire, permettait de les séparer. Chez les Romains, le plomb était très utilisé, en particulier pour les canalisations d'eau. Il rentrait également dans la composition de l'alliage cuivre-plomb-étain utilisé pour la fabrication des valves des réseaux d'eau (Lorenz, 2013). Allié avec de l'étain, il était également utilisé pour la soudure (Humpston, 2004).

---

<sup>47</sup> Lors de la coupellation, on fait chauffer le plomb argentifère aux alentours de 900°C. Le plomb se liquéfie, s'oxyde, et surnage sur l'argent, dont il peut être séparé en le faisant couler.



Canalisations en plomb de l'Empire romain

**plomb**

### **E. La chimie**

L'alchimie, qui remonte à l'antiquité, était un mélange entre de la chimie expérimentale, de la métallurgie, de la spiritualité, de la médecine, de la minéralogie, et un travail de théorisation de la nature. Il n'est pas question ici de détailler tout cela, et la lectrice ou le lecteur intéressé pourra se référer, par exemple, au livre de J. Baudet (Baudet, 2004). Nous allons par contre présenter quelques techniques expérimentales et quelques produits qui font partie de ce qu'on appelle avec notre catégorisation moderne la chimie.

Un des premiers produits chimiques de l'antiquité était le **savon**, dont les premières traces remontent aux Mésopotamiens en -2200 (Konkol, 2015). De manière générale, le savon est issu de la réaction entre un corps gras<sup>48</sup> et une base. Les corps gras utilisés peuvent être d'origine animale (suif<sup>49</sup>) ou végétale (diverses huiles). Les bases utilisées peuvent être de la soude (carbonate de sodium,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), de la soude caustique ( $\text{NaOH}$ ), de la potasse (carbonate de potassium,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ou de la potasse caustique ( $\text{KOH}$ ). L'utilisation de bases contenant du sodium ( $\text{Na}$ ) conduit à des savons durs, et de celles contenant du potassium ( $\text{K}$ ) à des savons mous. Dans l'antiquité, la manière principale de fabriquer des bases était la combustion de plantes et de bois, qui contiennent en quantité variable de la potasse, de la soude et un peu de potasse et soude caustique. Les plantes halophiles<sup>50</sup> telles que la *salsola kali* et la *salicorne* contiennent une quantité de soude supérieure aux autres plantes et étaient utilisées comme source pour la produire. Le natron pouvait également être utilisé. Par ailleurs, les cendres d'arbres sont une bonne source de potasse. Les

<sup>48</sup> Techniquement, les corps gras sont des acides carboxyliques à longue chaîne.

<sup>49</sup> Le suif est obtenu par la fonte de graisses animales.

<sup>50</sup> Les organismes halophiles vivent dans un milieu salé. Ils comportent des bactéries, des algues, et des plantes vivant à proximité de la mer ou de lacs salés. Parmi eux, on trouve le genre *Suaeda*, qui regroupe une centaine de plantes halophiles (les soudes), un nom à l'évidence lié à leur capacité à produire de la soude.

premières recettes de savons des Mésopotamiens mentionnent ainsi un mélange d'huile et de cendre de plantes (Konkol, 2015). Les Egyptiens détaillent également dans le papyrus Eber (-1500) un certain nombre de recettes dans lesquelles de l'huile est chauffée avec des substances basiques. Bien que le savon ne soit pas explicitement mentionné, il était donc probablement produit. Enfin, dans l'empire romain, l'existence de savons produits à partir de graisse de chèvre et de cendres de hêtre et de charme est rapportée au cours du I<sup>er</sup> siècle, ainsi que l'existence de savons durs et mous. Il est probable mais pas certain que de la chaux était utilisée dans certaines recettes de la période gallo-romaine, conduisant à la caustication<sup>51</sup> de la potasse et/ou de la soude. A cette époque le savon était utilisé pour les cheveux après l'ajout de colorants, et également lors de la peinture à l'encaustique<sup>52</sup> (Konkol, 2015).



(gauche) Bassin de saponification à Alep. (droite) Savons contemporains fabriqués avec de la cendre de bois.

## savon



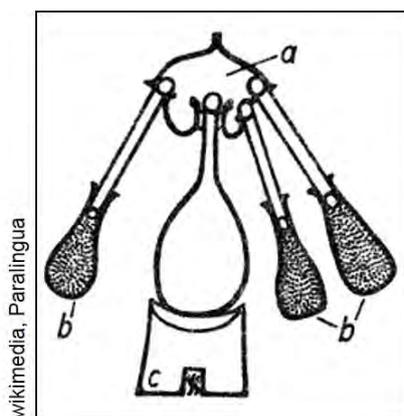
*Salsola kali et salicornie*

## *salsola kali* et la salicornie

<sup>51</sup> La caustication consiste à transformer potasse ou soude en leur équivalent caustiques en les faisant réagir avec de la chaux (CaO). Par exemple, pour la soude, les équations de réaction de la caustication sont :  $\text{CaO(s)} + \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2\text{(aq)}$ , et  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3\text{(s)} \rightarrow 2\text{NaOH(aq)} + \text{CaCO}_3\text{(s)}$ .

<sup>52</sup> La peinture à l'encaustique est basée sur l'utilisation de cire d'abeille et de pigments. Le savon intervient dans la recette de la peinture, permettant la préservation de certains pigments.

A partir de -300, en Grèce, des études systématiques sur la combustion, le chauffage et la distillation des substances eurent lieu, et les premiers appareils destinés à cet effet fabriqués. Vers le I<sup>er</sup> siècle, en Grèce, apparut ainsi le **tribikos**, une sorte d'alambic à trois bras, le **kérotakis**, qui permettait de chauffer ensemble plusieurs substances sur une plaque métallique, et le bain-marie<sup>53</sup>, permettant de dégager une chaleur modérée et constante (Bertherlot, 1887). Le premier véritable **alambic** apparut vers le III<sup>ème</sup> siècle. Les chimistes grecs possédaient de nombreuses recettes pour purifier les métaux ou les décaper, modifier leur densité, faire des dorures d'argent et d'or, fabriquer des métaux imitant les métaux précieux, écrire en lettre d'or, etc. Toutes ces recettes se basaient sur l'utilisation de nombreux métaux, minerais et composés: mercure, étain, arsenic, vinaigre, urine, **alun**<sup>54</sup>, natron, soufre, cinabre, **vitriol**<sup>55</sup>, etc (Bertherlot, 1887). Certains composés, tels que l'alun ou le vitriol, subissaient des étapes de lixiviation<sup>56</sup> : les roches étaient dissoutes dans l'eau, puis les composés extraits, concentrés, et coagulés (Karpenko, 2002).



wikimedia, Paralingua

Tribikos

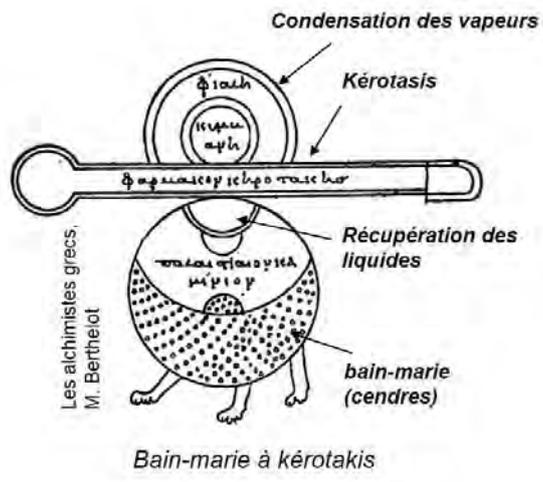
## tribikos

<sup>53</sup> Ces trois inventions sont attribuées à une alchimiste appelée Marie la Juive, dont l'existence et les réalisations ne sont connues que de manière indirecte.

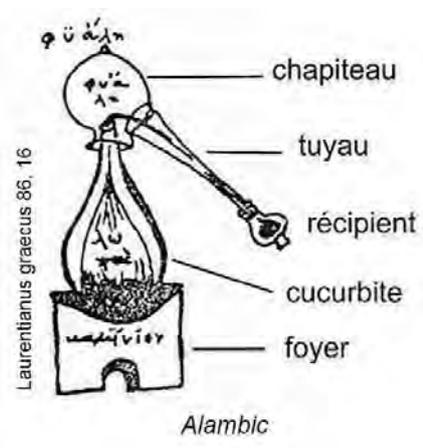
<sup>54</sup> L'alun est une roche composée de sulfate double d'aluminium et de potassium :  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ .

<sup>55</sup> Le vitriol est le terme générique utilisé à l'époque pour désigner des roches colorées (bleu, vert, rouge, blanc, principalement) contenant des sulfates de cuivre, fer, manganèse ou zinc. Les deux principaux sont le vitriol vert contenant du fer ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), et le bleu contenant principalement du cuivre ( $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$ ).

<sup>56</sup> La lixiviation consiste à extraire un composé parmi d'autres en utilisant le fait qu'il soit soluble dans un solvant donné, ici l'eau.



**kérotakis**



**alambic**



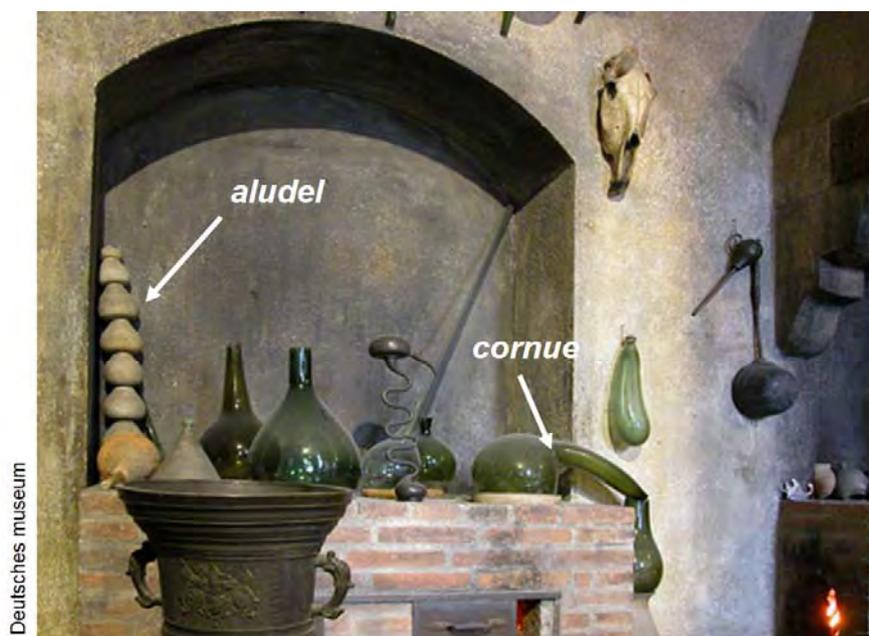
**alun**



**vitriol**

*Vitriols vert et bleu*

Les appareils et techniques de chimie connurent de nombreuses évolutions entre le VIII<sup>ème</sup> et le X<sup>ème</sup> siècle dans la civilisation islamique. Ainsi, tout l'appareillage de base de la chimie (pipettes, récipients, fourneaux, **cornue**<sup>57</sup>, **aludel**<sup>58</sup>, ...) et de nombreuses techniques (précipitation, coagulation, cristallisation, barbotage) furent décrites avec précision. Durant cette période, l'acide sulfurique fut synthétisé par la distillation sèche de vitriol<sup>59</sup> (Myers, 2007), et de l'alcool obtenu par distillation. A la même époque, les Chinois mettaient au point la poudre à canon, qui est un mélange de soufre, salpêtre et charbon de bois, et son dérivé festif, le feu d'artifice.



**cornue, aludel**

*Reconstitution d'un atelier d'alchimie*

## **F. Vêtements, tissus et cordage**

Les premiers habits de nos ancêtres étaient constitués de peaux d'animaux. Dans un premier temps, ils étaient probablement simplement noués. Puis, les vestiges d'aiguilles datant du Paléolithique supérieur<sup>60</sup> nous indiquent que, à partir de cette période, les peaux étaient cousues entre elles. Afin d'être utilisables comme habits, les peaux doivent subir une longue série d'opérations

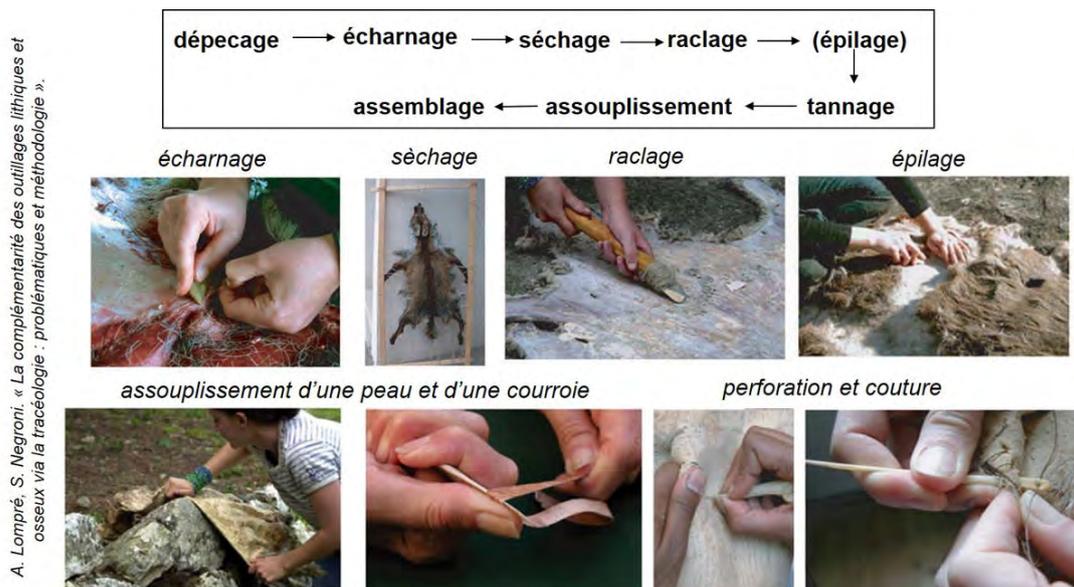
<sup>57</sup> La cornue est un récipient comportant un long col recourbé, permettant de refroidir puis recueillir les vapeurs d'une substance chauffée.

<sup>58</sup> L'aludel est une sorte d'alambic, mais est composé de plusieurs sphères superposées, et ressemble donc par certains côtés à une colonne de distillation.

<sup>59</sup> La combustion sèche de vitriol produit du SO<sub>3</sub> et de l'eau, qui se combinent suivant SO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O→H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

<sup>60</sup> Le Paléolithique supérieur correspond au développement chez l'homme de l'art et d'outils plus complexes. Il débute environ 35000 ans avant notre ère.

afin de les transformer en **cuir** : dépeçage, écharnage<sup>61</sup>, séchage, raclage de l'hypoderme, éventuellement épilage / affleurement<sup>62</sup>, tannage<sup>63</sup>, assouplissement et enfin assemblage (Lompré, 2006). La plupart de ces opérations sont mécaniques et nécessitent quelques outils simples : lames, grattoirs, racloirs, spatules, lisseur et poinçons. L'épilage peut être réalisé mécaniquement mais également en utilisant des produits basiques (chaux, cendre) afin d'attaquer l'épiderme. Le **tannage** peut être réalisé de différentes manières. Avant le Néolithique, on utilisait le tannage par la fumée et/ou un tannage à la graisse, qui consiste à frotter la peau avec des matières grasses animales (moelle, cervelle). Une autre méthode, dont on retrouve les premières traces chez les Egyptiens, est le tannage végétal. Il consiste à faire tremper la peau avec des tannins, qui sont essentiellement des écorces en poudre (pin, hêtre, tilleul, épicéa, châtaigner, etc). A partir du Néolithique, il devint également possible d'effectuer un tannage à l'huile végétale, et non pas à la graisse animale. Une autre possibilité, utilisée chez les Egyptiens et les Romains, est le tannage minéral, basé sur l'utilisation d'alun. Enfin, les Romains utilisaient également l'urine, qui était par conséquent collectée chez les particuliers. Le vitriol était utilisé comme agent noircissant pour le cuir.



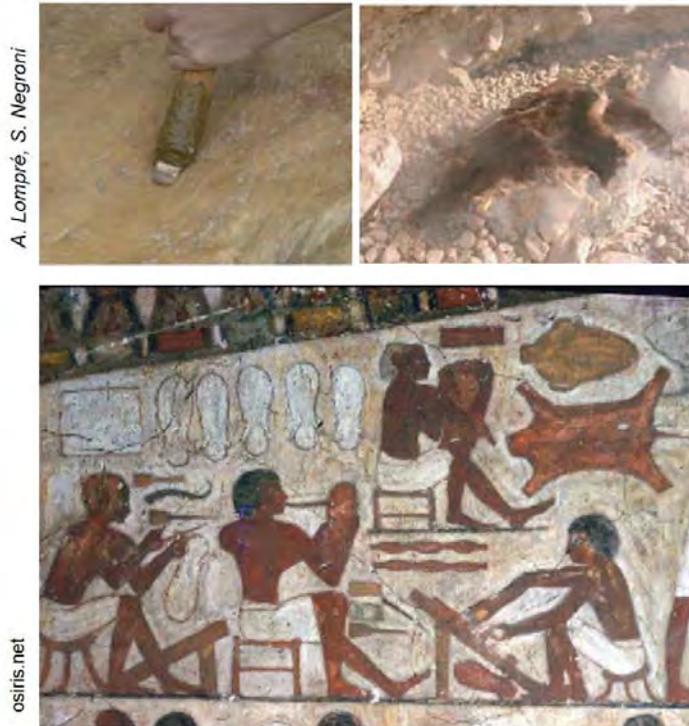
Représentation schématique des étapes de la fabrication du cuir et image de certaines étapes

## cuir

<sup>61</sup> L'écharnage consiste à enlever les petits restes de chair accrochés à l'hypoderme.

<sup>62</sup> L'épilage et l'affleurement sont facultatifs et consistent à enlever les poils, puis l'épiderme.

<sup>63</sup> Le tannage représente l'ensemble des étapes qui permettent de rendre la peau imputrescible et imperméable à l'eau. Quelle que soit la méthode utilisée, des réactions chimiques avec le collagène de la peau doivent avoir lieu.



## tannage

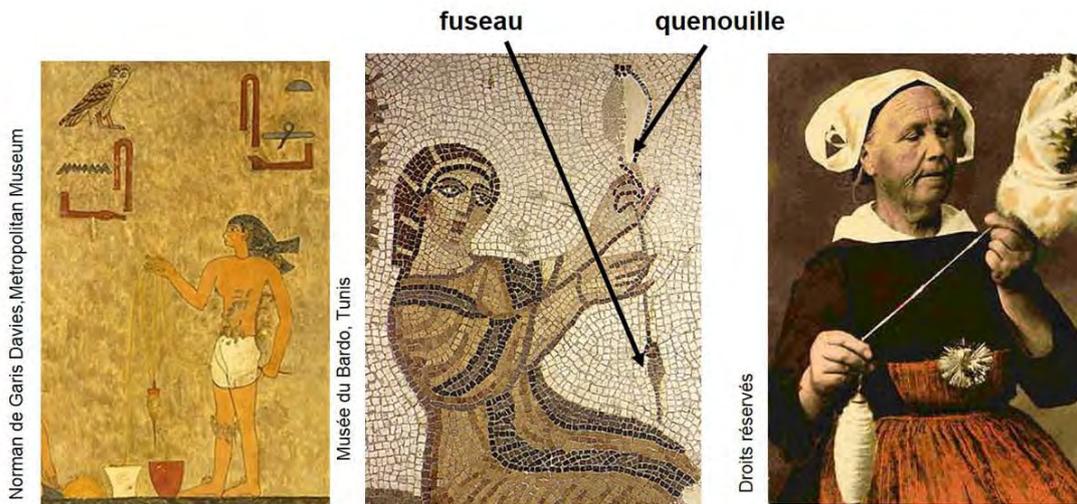
(en haut à gauche) Tannage à la cervelle. (en haut à droite) tannage à la fumée. (bas) Tannage et travail du cuir, tombe de Rekhmiré, Egypte, -1500

La fabrication de fils ou de cordes était basée sur le tressage ou l'entortillage de fibres végétales ou animales. Les premières cordes découvertes datent de -28000. Suivant les civilisations, les cordes étaient fabriquées en fibres de coco, chanvre, palmier, roseau, alfa<sup>64</sup>, lin, etc. Les fils nécessitent des fibres plus fines et étaient fabriqués à partir de lin, de coton, de laine ou de poils de lama, par exemple. Pour obtenir des fibres végétales, plusieurs étapes sont nécessaires, permettant la séparation des fibres du reste de la plante. Le rouissage<sup>65</sup> est l'étape la plus longue et nécessite de laisser les plantes dans de l'eau ou en milieu humide. Les fibres sont ensuite séparées mécaniquement du reste de la plante et peignées pour ne conserver que les longues fibres, et pour les aligner les unes avec les autres. La technique de fabrication du fil proprement dit, appelée **filage**, restera à l'identique jusqu'au XIII<sup>ème</sup> siècle, et consiste à entortiller les fibres en s'aidant d'une quenouille et d'un fuseau<sup>66</sup>. Les fils et les tissus pouvaient subir un blanchiment, avec du natron, par exemple.

<sup>64</sup> L'alfa est une plante riche en fibres poussant dans les régions arides du bassin méditerranéen.

<sup>65</sup> L'étape de rouissage sépare l'écorce de la tige

<sup>66</sup> La quenouille est une réserve de fibres non filées. Le fuseau est un objet un peu lourd qui est utilisé comme volant d'inertie et mis en rotation périodiquement de manière à conserver un mouvement de rotation pendant que le fil se forme progressivement.



Filage : (gauche) Egypte, -1900. (milieu) Tabarka, Tunisie +300. (droite) Bretagne, +1900

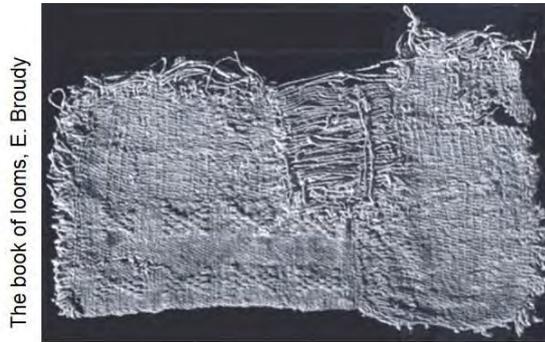
## filage

Le principe du tissage est resté inchangé depuis des millénaires, seule sa mécanisation ayant évolué. Il consiste à tendre une rangée de fils (les fils de chaîne) dans un sens, disons vertical, puis à passer un fil (le fil de trame) horizontalement entre les rangées paires et impaires des fils de chaîne. Si dans un sens, le fil de trame passe au-dessus des fils de chaîne impairs, il passe au-dessus des fils pairs au retour. Le fil de trame est enroulé autour ou à l'intérieur d'une navette, manipulée par le tisserand ou la tisserande et qui, comme son nom l'indique, effectue donc des allers-retours. Il est extrêmement difficile de dater le début du tissage mais, dans toutes les civilisations, les traces de tissage remontent au moins au Néolithique. Ainsi, le plus **vieux tissu**, retrouvé en Egypte, date de -3300, et est contemporain d'une représentation de métier à tisser sur une poterie trouvée dans la même région (Stevenson, 2016). On peut trouver de nombreux types de métiers à tisser dans l'antiquité, qui ont tous en commun de disposer dès cette époque d'un système permettant d'écarter les fils pairs et impairs, et d'inverser rapidement leurs positions respectives (Broudy, 1979). Le système le plus simple pour cela nécessite deux bâtons de bois correctement agencés, dont l'un est relié à un fil sur deux. Ceci évite l'opération très longue consistant à faire zigzaguer la navette entre les fils, qui a été très probablement la première méthode utilisée. En Amérique précolombienne, on utilisait des **métiers à tisser de ceintures**, dont la forme a perduré jusqu'à aujourd'hui. Les Egyptiens ont tout d'abord utilisé des **métiers horizontaux**, avant de développer de larges et hauts **métiers verticaux**. Dans l'Empire gallo-romain, on utilisait des métiers verticaux à pesons dans lesquels les fils de chaînes sont maintenus en tension par des poids (pierre, poterie). Quant à la **soie**, matériau un peu à part dans le panorama du tissage, elle est apparue vers -2500 en Chine, qui en faisait le commerce sans vouloir en dévoiler la nature, conduisant à la fameuse route de la soie. C'est seulement au VI<sup>ème</sup> siècle que le secret fut levé, et que des œufs de vers à soie arrivèrent dans l'Empire byzantin. La culture de la soie se propagea alors en Occident. Le dévidage des cocons, la

formation du fil de soie et son tissage nécessite un ensemble de machines spécifiques, ainsi que des métiers à tisser complexes, qui furent développés par la civilisation chinoise (Broudy, 1979).



Petrie Museum



The book of looms, E. Broudy

(gauche) Plus vieux tissu du monde, Egypte, -3300. (droite) Tissu de coton, Pérou, -2300

## vieux tissu



Felipe Guaman Poma de Alaya

Métier à tisser de ceinture Inca, XVI<sup>ème</sup> Siècle

## métiers à tisser de ceintures



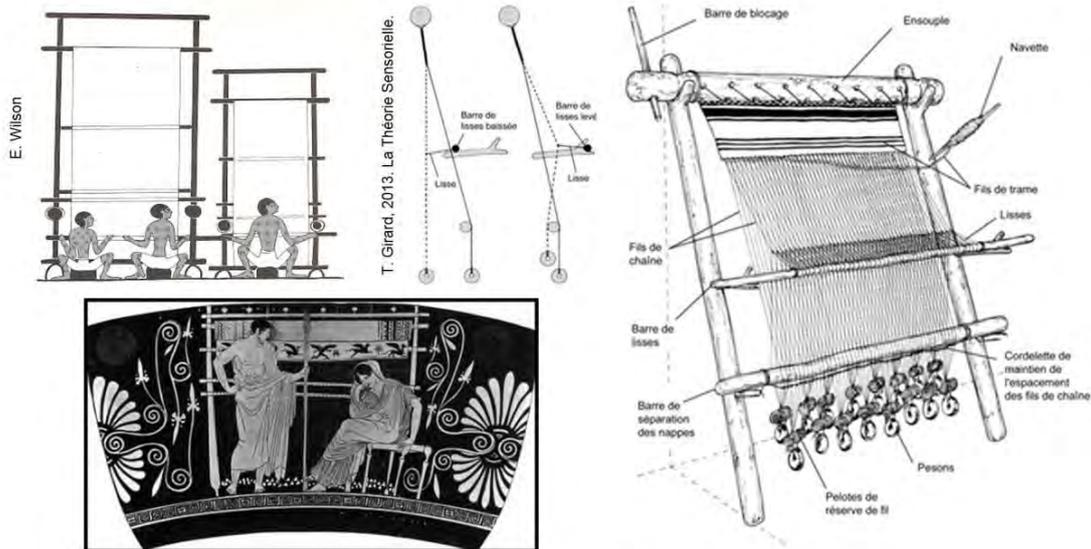
Metropolitan museum of art



Norman de Garis Davies, Metropolitan Museum

(gauche) Métier à tisser horizontal, Egypte, -3600. (droite) Métier horizontal, Egypte, -1900

## métiers horizontaux



(en haut à gauche) Métier vertical, Egypte, Tombe de Thot, -1400. (en bas à gauche) Pénélope et son métier à tisser, Italie -400. (droite) Principe du métier à tisser vertical à pesons, Gaule -1500

## métiers verticaux



Gerd A. T. Müller

Cocon de ver à soie

## soie

### G. L'habitat

Dans cette partie, nous ne mentionnerons que les techniques utilisées pour la construction des habitations et édifices les plus courants. Nous laisserons de côté celles utilisées par les humains pour élaborer des monuments colossaux, et pour lesquelles les techniques utilisées, toujours à la limite de ce qui étaient technologiquement réalisables aux époques où ils ont été construits, laissent encore souvent les archéologues un peu perplexes (que l'on pense à Stonehenge, aux statues de l'île de Pâques ou aux pyramides d'Égypte).

Les habitations de plein air des chasseurs-cueilleurs des premiers temps ne se sont pas conservées, et seules les habitations dans les grottes, qui n'étaient pas les plus courantes, mais mieux conservées, ont fourni des informations fiables à ce sujet. La taille et la structure des habitations de plein air sont souvent déduites indirectement de la présence de trous de poteaux ou de pierres visant à les maintenir. Quoi qu'il en soit, on considère actuellement que la plupart des

**habitations des chasseurs-cueilleurs** avaient une structure faite de longues branches ou de troncs, et étaient couvertes de végétaux ou de peaux d'animaux (Guéneau, 2009). Dans certaines régions, des structures en os de mammouths ont également été retrouvées.



## habitations des chasseurs-cueilleurs

La sédentarisation s'est accompagnée de la construction d'**habitations plus robustes**, dont les matériaux de base étaient fonction des ressources à proximité : terre crue, torchis<sup>67</sup>, brique crue<sup>68</sup>, bois, roseaux ou pierres sèches (Michel, 2015). La **brique cuite** était utilisée chez les Mésopotamiens et les Grecs, mais son emploi ne s'est généralisé dans la construction qu'à l'époque romaine. Quant à la pierre de taille, elle était le plus souvent réservée aux gros édifices. L'utilisation de pierre et l'édification de gros et hauts bâtiments sont grandement facilitées si l'on dispose de bons outils de taille et de moyens de levage conséquents. Concernant le premier point, il a été récemment montré que des **scies hydrauliques** étaient utilisées dans des carrières de marbre de l'Empire Romain au III<sup>ème</sup> siècle, même si l'ampleur de leur dissémination reste pour l'instant incertaine (Grewe, 2007). Concernant le deuxième point, la découverte de la poulie, et en particulier du **palan**<sup>69</sup> vers -200, permit de concevoir différents types d'engins de levage (des **chèvres**) permettant de soulever des poids allant jusqu'à 20 tonnes et de les déplacer suivant un ou deux axes (Fleury, 1993). La **chèvre à tympan** était l'engin permettant de soulever

<sup>67</sup> Le torchis est un mélange de terre, souvent argileuse, et de paille ou de foin.

<sup>68</sup> La brique crue est un mélange d'argile et de terre, parfois compactée et séchée à l'air libre sans cuisson.

<sup>69</sup> Le palan est un système composé de plusieurs poulies entre lesquelles la corde fait des allers-retours. En multipliant le nombre de poulies et le nombre d'allers-retours, on peut considérablement diviser la force nécessaire pour lever un poids.

les charges les plus lourdes. Pour soulever les pierres, il fallait également avoir à sa disposition des systèmes de préhension adaptés, et plusieurs ont été utilisés. On pouvait utiliser des **griffes auto-serrantes**, qui s'enfonçaient dans des trous creusés sur les côtés de la pierre. On pouvait également laisser dépasser des **tenons** des pierres, qui étaient supprimés après la mise en place. Enfin, le système à **queues d'aronde**<sup>70</sup> nécessitait de creuser dans le sommet de la pierre un trou de forme précise dans lequel était glissé un anneau préhenseur.



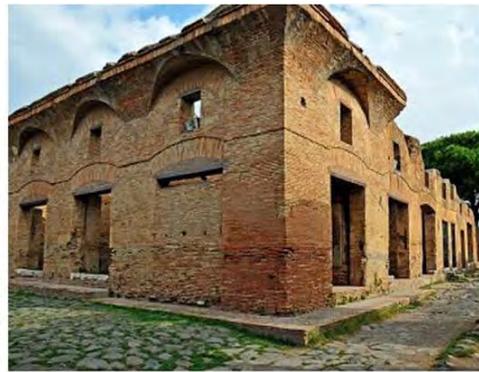
## habitations plus robustes

<sup>70</sup> La queue d'aronde permet de maintenir deux pièces à angle droit ou alignées en formant dans une des pièces des encoches, le plus souvent en forme de trapèze, et dans la deuxième les formes complémentaires.



UCBN/CNRS/MRSH

© UCBN/CNRS/MRSH



Dennis Jarvis



Service archéologie  
vieuxlaromaine.fr



toulouse-brique.com

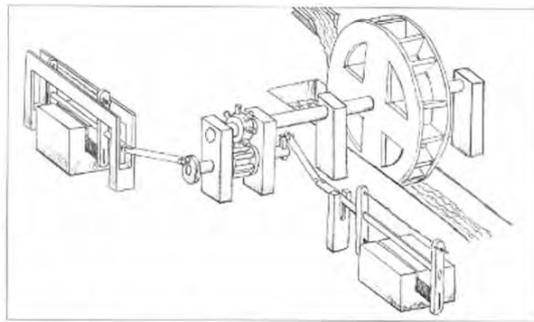
(en haut à gauche) Rue de Rome avec ses insulae (immeubles populaires). (en bas à gauche) Domus (maison riche), Vieux-la-Romaine, III<sup>ème</sup> Siècle. (en haut à droite) Insula à Ostia, Italie. (en bas à droite) (Muraille en brique cuite, Institut catholique, Toulouse.

## brique cuite



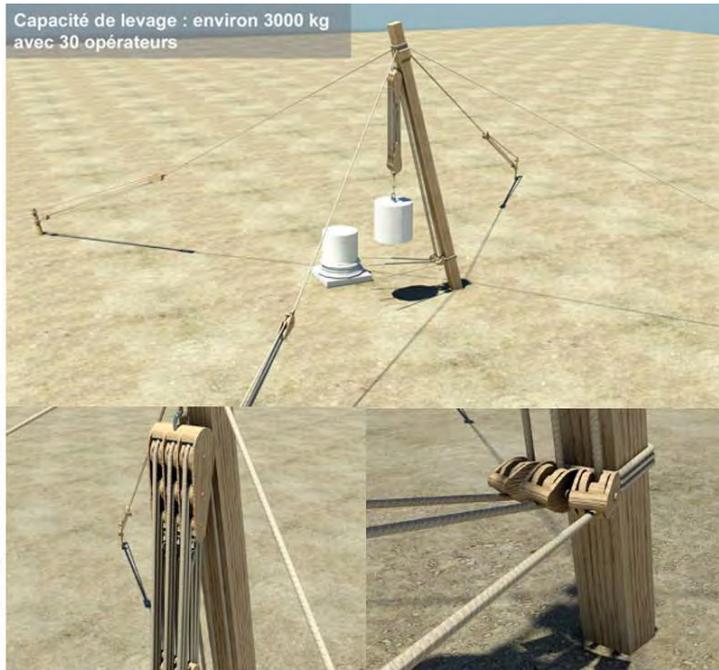
K. Grewe

P. Kessener



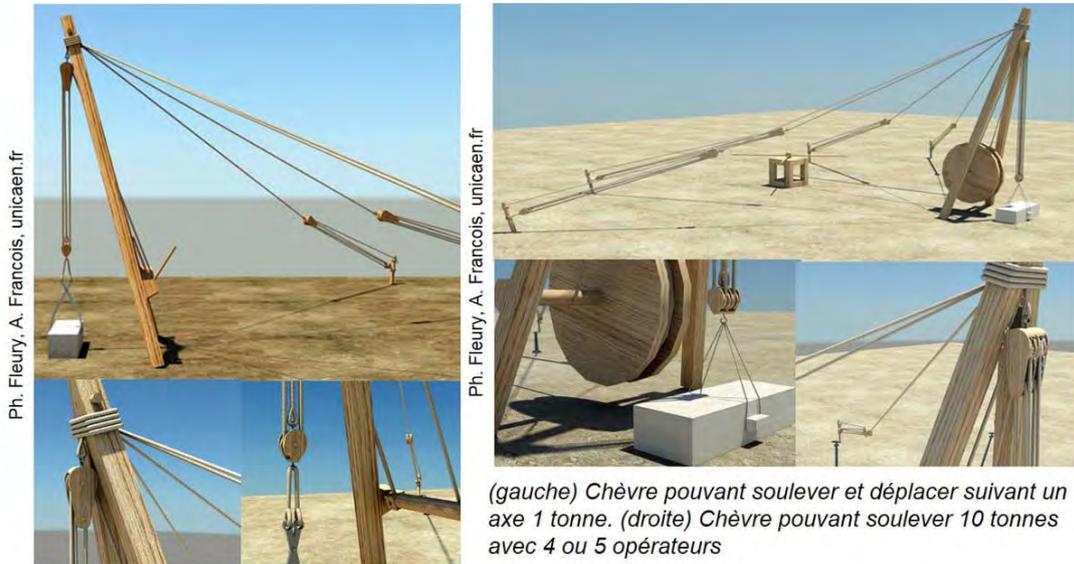
(gauche) Gravure sur un sarcophage romain, Turquie, III<sup>ème</sup> siècle. (droite) Reconstitution de la scie hydraulique représentée.

## scies hydrauliques

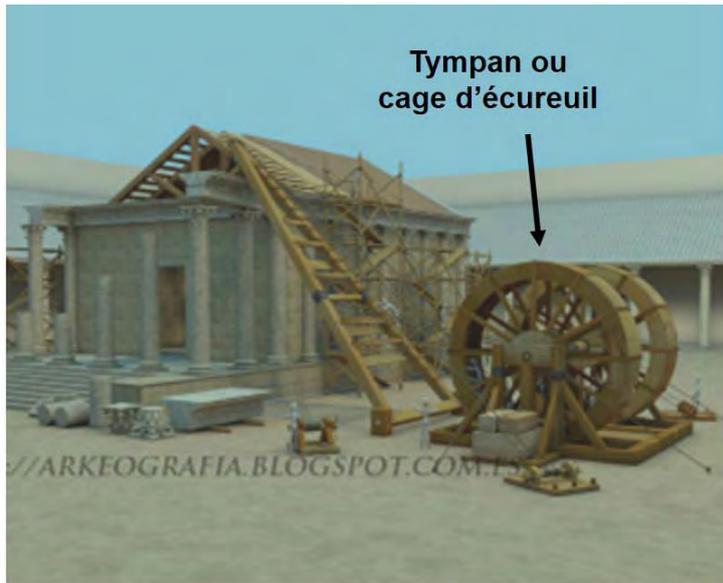


**palan**

*Mât pouvant soulever et déplacer suivant deux axes 3 tonnes avec 30 opérateurs*

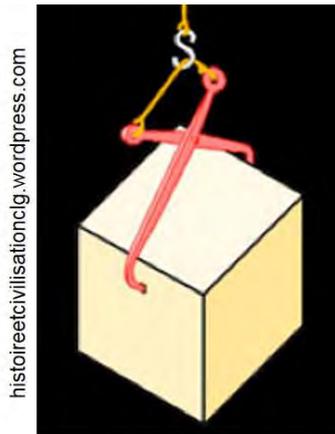


**chèvres**



**chèvre à tympan**

*Chèvre à tympan*



**griffes auto-serrantes**

*Griffes autoserrantes*

S. Madeleine

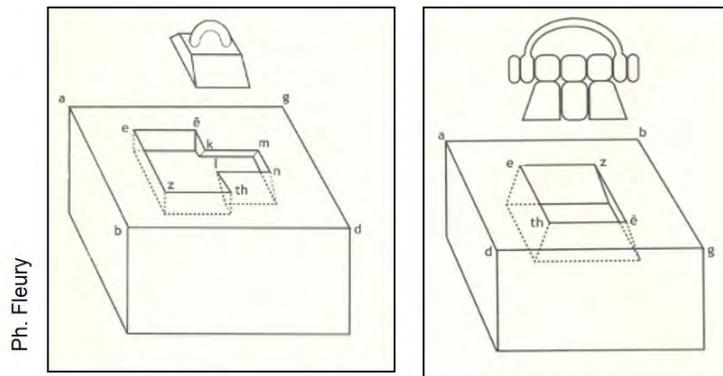


Ph. Fleury, A. François



*Tenons dépassant et taillés après la mise en place. Escaliers des arènes d'Arles*

**tenons**



Ph. Fleury  
 Système de préhension à queue d'aronde. (gauche) Pièce unique. (droite) Pièces multiples.

## queues d'aronde

Un élément essentiel pour la solidité et la durabilité des constructions en pierre ou brique est le mortier<sup>71</sup>. Ceux utilisés dans l'Antiquité étaient composés de sable, de chaux et d'argile, dans des proportions assez variables. Parfois, de l'argile ou de la résine étaient simplement employées. Les Romains ont réussi à fabriquer un mortier d'excellente qualité, qui a permis la construction de nombreux édifices d'envergure en pierre et mortier, et également de maisons à étages. La qualité de ce mortier explique la très bonne conservation de certains édifices romains jusqu'à notre époque.

D'autres produits étaient également utilisés pour la construction. Ainsi, les colles étaient fabriquées avec des résines ou en cuisant des peaux, des os ou des tendons d'animaux. Un produit couramment utilisé dans les zones où il était disponible (Moyen-Orient) est le bitume<sup>72</sup>, généralement en tant que mastic mélangé à de l'argile, ou en tant que couverture imperméabilisante. Quant aux Romains, ils utilisaient plutôt des goudrons de bois<sup>73</sup>, de la poix<sup>73</sup> ou des gommes<sup>74</sup> pour ce type d'usage.

Les **toits**, quant à eux, avaient une structure en bois, construite sans clou mais en utilisant des cordes, chevilles ou queues d'aronde. Dans les civilisations les plus anciennes, ils étaient recouverts de végétaux (feuilles de palmier, chaume, alfa) et/ou de terre. La tuile cuite apparut en Grèce, et fut ensuite utilisée systématiquement par les Romains. Dans l'Empire byzantin, les tuiles étaient parfois séparées par des feuilles de zinc. Quant aux fenêtres, dans les rares cas où elles existaient, elles étaient faites en papier ou toile huilés, ou en

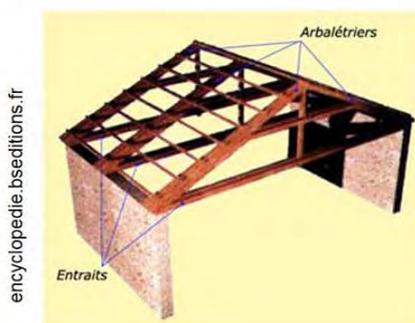
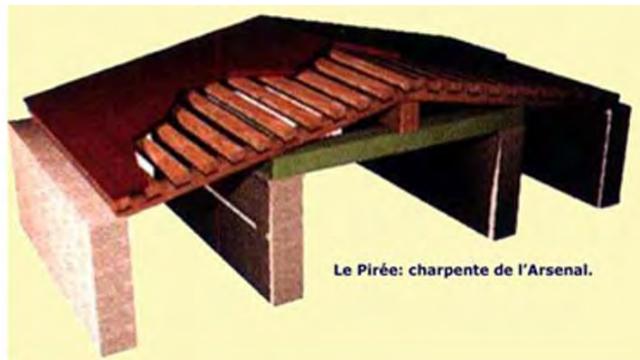
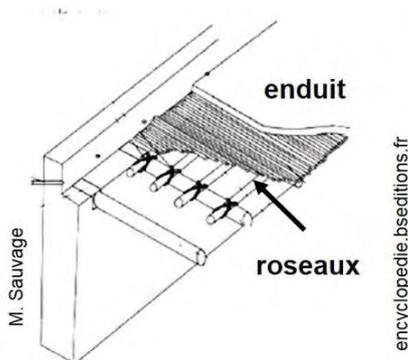
<sup>71</sup> Le mortier est un matériau plus ou moins liquide, qui durcit en séchant, et permet de créer un joint entre deux éléments de construction (briques, pierres) afin de combler les inhomogénéités, assurer l'étanchéité, et homogénéiser les forces.

<sup>72</sup> Le bitume est un matériau composé d'hydrocarbures lourds, que l'on peut trouver à l'état naturel dans des gisements pétrolifères affleurants. Il est de nos jours obtenu comme résidu après la distillation du pétrole.

<sup>73</sup> La poix et les goudrons de bois sont tous deux des matériaux visqueux et collants obtenus par distillation de bois résineux. Ainsi, en chauffant du bois et en condensant les vapeurs produites, on peut obtenir à la fois du charbon de bois et du goudron.

<sup>74</sup> La gomme naturelle est produite par les arbres et s'écoule lors d'une blessure ou incision de l'arbre. La fameuse gomme arabique est produite par les arbres de la famille de l'acacia.

feuilles de mica<sup>75</sup>. La technique du verre soufflé chez les Romains permit d'installer les premières vitres, qui étaient montées sur un châssis de métal ou de bois, éventuellement amovible.



(en haut à gauche) Toit mésopotamien, Irak, -2000  
 (en haut à droite) Charpente grecque: tient par entassement. Portée de 10 m.  
 (bas) Charpente romaine à entrails. Triangle solidaire. Portée 20 m

## toits

Nous présentons maintenant quelques éléments concernant l'intérieur des habitations. Leur sol pouvait être en plâtre, argile, terre battue ou bouse de vache délayée, et elles disposaient le plus souvent d'un four ou d'un foyer. Les banquettes ou sièges pouvaient être en bois ou en argile; le lit, s'il n'était pas une simple natte, consistait en un cadre de bois tressé de cordes ou d'osier. Concernant le **meubler**, des études détaillées de maisons en Mésopotamie et en Egypte illustrent bien le contenu typique de maisons de l'Antiquité (Michel, 2015): on trouvait de nombreuses céramiques destinées à la conservation et la cuisson des aliments, des vases à bières, des meules et mortiers, du mobilier en bois (tables, coffres), des corbeilles en vannerie, des sacs ou outres en cuirs, des textiles (couvertures, coussins), des métiers à tisser, des fuseaux, et des bijoux. Les objets métalliques, en cuivre ou bronze, notamment destinés à la cuisine, étaient les biens les plus précieux. Les maisons contenaient également les objets liés à l'activité extérieure à la maison : chasse, pêche, agriculture, guerre, etc. Dans certaines civilisations, des toilettes étaient présentes dans les maisons, avec parfois de l'eau courante et un réseau d'évacuation. Dans d'autres, un simple pot à l'intérieur des maisons était utilisé. Dans de nombreuses civilisations, les selles étaient collectées pour enrichir les sols agricoles.

<sup>75</sup> Le mica est un matériau scintillant qui se présente sous forme de feuillets. Ces feuillets sont transparents, très résistants à la chaleur, et sont encore utilisés de nos jours dans les poêles ou les lanternes.

De la maison à la ville dans l'Orient ancien : la maison et son mobilier »,  
C. Michel, Archéologies et Sciences de l'Antiquité (2015)



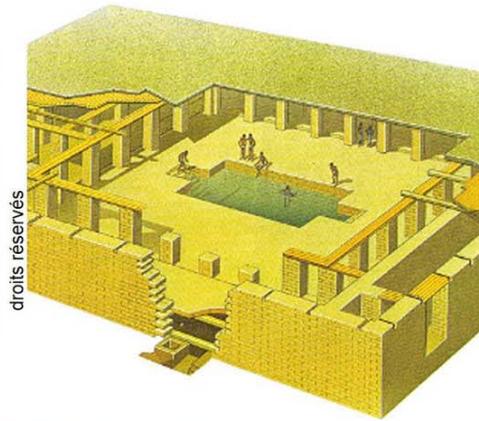
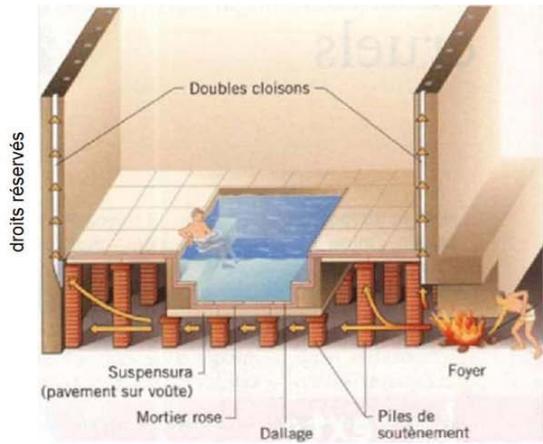
Objets du mobilier  
mésopotamiens :  
Céramiques, objets  
métalliques, lit, four à pain,  
tabouret, mortier et vase à  
bière.

## mobilier

Enfin, en ce qui concerne la régulation de température, on peut noter que, dans la vallée de l'Indus, des systèmes d'**hypocauste**<sup>76</sup> existaient dans les bains publics dès le III<sup>ème</sup> millénaire. Ce système fut également très utilisé par les romains pour chauffer les thermes et les maisons des plus fortunés. En Chine, on trouvait des **kangs**, qui sont de longues banquettes de briques ou terre servant de lit, de table et de calorifère (Zhuang, 2009). La chaleur provenant d'un foyer circulait dans une cavité à l'intérieur de la banquette. Ce système est apparu vers -700, et est encore utilisé dans les zones rurales du nord de la Chine. Néanmoins, mis à part ces quelques contre-exemples, le chauffage dans les maisons était la plupart du temps assuré par de simples braseros ou foyers. Enfin, dans les pays les plus chauds (Islam, Inde), on utilisait des **pankas**<sup>77</sup> pour rafraîchir, mais il était réservé aux personnes ayant des serviteurs pour les actionner.

<sup>76</sup> Les hypocaustes sont des systèmes de chauffage par le sol et les murs. Le sol de la pièce à chauffer était posé sur un réseau de petits piliers au-dessus d'un espace vide communiquant avec un foyer, situé à l'extérieur du bâtiment. Des cheminées passaient à l'intérieur des murs et permettaient l'évacuation des fumées tout en chauffant les murs.

<sup>77</sup> Le pankas est un grand tissu suspendu verticalement au plafond, mis en mouvement à l'aide d'une corde et d'une poulie, afin de brasser l'air.



(en haut à gauche) Principe de l'hypocauste. (en bas à gauche) Hypocauste romain, Vieux-la-Romaine. (droite) Reconstitution et photo des bain public à Mohenjo-daro, Pakistan, -2000

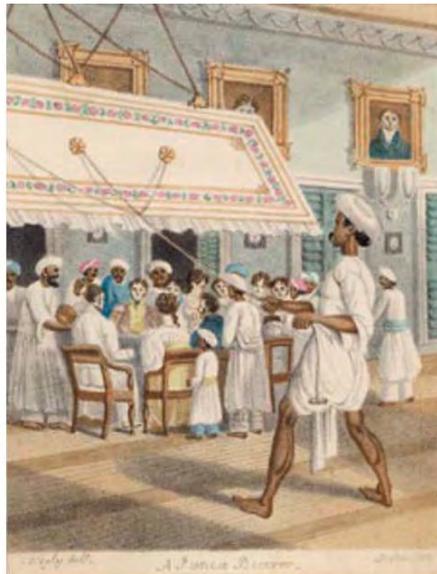
## hypocauste



H.E.M. James

## kangs

Kang dans un hôtel, Chine, 1887



droits réservés

*Panka, Inde, date inconnue*

**pankas**

## **H. Feu et lumière**

Pour allumer un feu aux temps préhistoriques, une première méthode utilisée était celle du briquet à **amadou**<sup>78</sup>, utilisant pyrite ou **marcassite**<sup>79</sup> comme source d'étincelle (Collina-Girard, 2005). A défaut d'amadou, de l'étoupe<sup>80</sup> pouvait être utilisée. La deuxième consistait à mettre en rotation un bout de bois sur une planche de bois (**planche à feu**) ou à frotter un bout de bois, par exemple du bambou, contre un autre. Après la découverte du fer, il fut également possible de produire des étincelles en percutant un objet métallique avec une pierre dure. Les Chinois, vers -1000, utilisaient des **miroirs** en bronze d'une dizaine de centimètres de diamètre pour faire du feu (Heman, 2016). Il semble également que le transport et la conservation du feu étaient très répandus, évitant d'avoir à le rallumer.



wiki commons

outdoors-magazine.com



**amadou**

*(gauche) Amadouvier. (droite) Amadou.*

<sup>78</sup> Ce briquet consiste à frapper pyrite ou marcassite avec une roche dure, de manière à projeter des éclats, qui s'enflamment et forment de petites étincelles. Ces dernières sont projetées sur l'amadou, chair d'un champignon, qui se consume, formant une petite braise, suffisante pour allumer un feu.

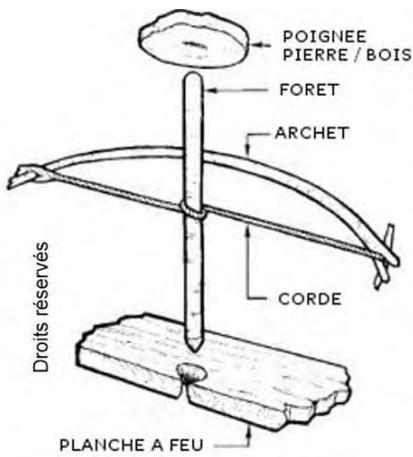
<sup>79</sup> La marcassite et la pyrite sont composées de  $FeS_2$ , mais leurs structures cristallines diffèrent. La marcassite, moins dure, est préférable pour l'allumage d'un feu.

<sup>80</sup> L'étoupe est un agglomérat de fibres végétales.



(gauche) Blocs de marcassite. (droite) Allumage d'amadou avec de la marcassite

### marcassite



Droits réservés



(gauche) Schéma d'une planche à feu. (droite) Bâton à feu, grotte de Guitarrero, Pérou, -12000

### planche à feu

Henan museum



Miroir en bronze Yang-sui, diamètre 7.5 cm, Chine, -700

### miroirs

Les premières **lampes** dont on retrouve la trace étaient constituées de pierres creuses, contenant une huile végétale ou du suif, et d'une mèche composée d'un matériau végétal fibreux tressé (roseau, lin, chanvre, coton...). Chez les Mésopotamiens, le pétrole était également utilisé, en plus de graisses végétales et animales. A compter du Néolithique, les lampes étaient souvent fabriquées en terre cuite et, à partir des Grecs et des Romains, elles étaient parfois en métal.

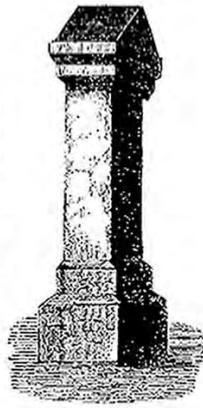


## lampes

Lampes de différentes époques et matériaux.

La navigation était facilitée par la présence de sources lumineuses intenses à terre. La première mention de phare dans la littérature grecque date d'environ -600, et situe l'un d'entre eux sur le **promontoire de Sigée**. Il s'agissait alors d'une simple tour de faible hauteur, au sommet de laquelle brûlait un feu (Figuier, 1870). Le mythique **phare d'Alexandrie**, datant de -280, comprenait un gigantesque brasier ainsi qu'un miroir, ce dernier servant à refléter la lumière du soleil pendant la journée. Sa hauteur était d'environ 130 mètres, et sa lumière était visible d'une cinquantaine de kilomètres. Sa structure à plusieurs étages de diamètre décroissant a par la suite constitué l'archétype du **phare romain** et se retrouve dans nombre d'autres phares, comme ceux de Douvres ou de Boulogne-sur-Mer, par exemple.

Montfaucon, l'antiquité expliquée



### promontoire de Sigée

Tour du promontoire de Sigée (d'après des textes), Grèce -600.

Hermann Thiersch



### phare d'Alexandrie

Phare d'Alexandrie, environ 130 m de haut, Egypte, -280.



John Cherrington

Sommet médiéval, base romaine

Encyclopédie Diderot

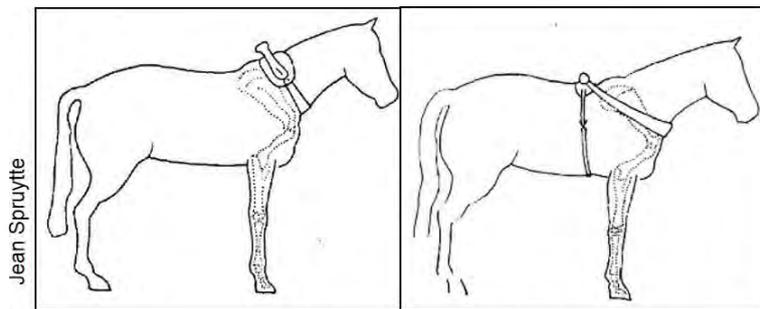


(gauche) Phare romain de Douvre, environ 20 m de haut, Angleterre, +43.  
(droite) Phare romain de Boulogne sur mer, 40 m de haut, France, +43.

### phare romain

## I. Transports et communications

Bœufs, buffles, ânes, rennes, chiens, chevaux et dromadaires ont été les premiers animaux mis à contribution pour le transport des humains et des marchandises. Les différents animaux avaient chacun leur spécificité : les ânes et mulets étaient très appréciés pour leur rusticité et leur résistance ; les bœufs étaient adaptés au transport des charges les plus lourdes ; quant aux chevaux, animaux prestigieux, ils étaient adaptés au transport rapide de charges légères et pour un usage militaire, mais peu utilisés pour le transport. Il faut également noter que le lourd cheval de trait moderne, adapté aux travaux agricoles et au transport de lourdes charges, est issu de sélections génétiques et n'apparut qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, le cheval antique étant plus proche de nos poneys actuels (Franck, 2015). La morphologie particulière des chevaux<sup>81</sup> a nécessité le développement de **jougs** adaptés, dont les deux types possibles sont le joug d'encolure et le joug dorsal. Le premier a été utilisé par les Egyptiens, et le second par les Grecs. L'assertion qui a longtemps prévalu en histoire des techniques selon laquelle ces jougs antiques n'étaient pas adaptés aux chevaux semble aujourd'hui clairement réfutée (Raepsaet, 1979 ; Franck, 2015 ; Amouretti, 1991).



### **jougs**

*Joug d'encolure (Egyptiens) et joug dorsal (Grecs)*

Le système le plus simple permettant le transport est le **travois**<sup>82</sup>, dont on trouve les premières traces en Europe vers -3000. Dans les pays froids, on trouvait son équivalent sous la forme du traîneau à neige. Le charriot à deux **roues**, sous sa forme la plus simple, est un travois auquel sont rajoutés un essieu et deux roues. Les premières traces de tels chariots remontent au milieu du IV<sup>ème</sup> millénaire en Mésopotamie et en Europe (Petrequin, 2005). Il n'est par contre jamais apparu en Amérique précolombienne. Le chariot a subi plusieurs évolutions. Ainsi, on retrouve des représentations du **chariot** à quatre roues, moins maniable mais plus adapté au transport de lourdes charges, en Mésopotamie (III<sup>ème</sup> millénaire). Par ailleurs, les roues, qui étaient à l'origine en

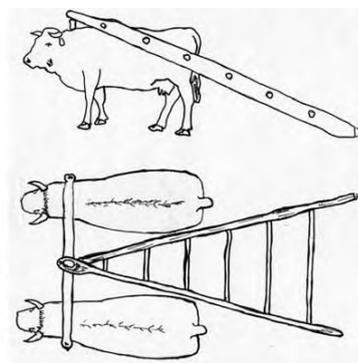
<sup>81</sup> Un joug mal conçu gêne les chevaux en bloquant leur respiration lorsqu'ils effectuent l'effort de traction. Ce n'est pas le cas chez les ânes, mulets ou bœufs.

<sup>82</sup> Un travois est une sorte de charriot sans roue, composé de deux longs bâtons reliés entre eux par quelques traverses. Une extrémité des bâtons est fixée à l'animal, et l'autre traîne sur le sol.

bois massif, se sont progressivement évidées pour être allégées, jusqu'à conduire à la **roue à rayons**, dont on a retrouvé des vestiges datant de -1000 en Mésopotamie. La bande de roulage fut également renforcée, d'abord par du cuir, puis des clous métalliques (-2000), avant d'être véritablement **cerclées** par une bande de fer vers -700 (Lay, 1992). Les évolutions dans les techniques d'attelage – par exemple les brancards<sup>83</sup>, l'utilisation de plusieurs paires d'animaux ou l'attelage en file –, ainsi que dans celui de la conception des **voitures**<sup>84</sup> ont permis, à la période gallo-romaine, de disposer d'une grande diversité de moyens de transports, adaptés au poids de la charge, à l'animal, et à la distance. Ainsi, il était possible à cette époque de transporter les bases des colonnes de pierre, dont le poids avoisine les sept tonnes (Amouretti, 1991).



P. Pétrequin



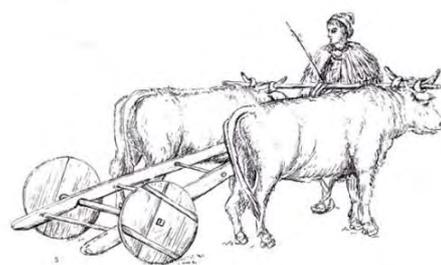
H. Pellegrini

## travois

*Travois, Chalain (France), -3040, et reconstitution de son utilisation*



neolithiqueblog  
wordpress.com



## roues

*Roues pleine, roue à traverses, et charriot, Suisse, -2600*

<sup>83</sup> Les brancards sont les deux pièces de bois encadrant un animal attelé. Avant l'utilisation du brancard, la voiture était trainée par un timon, pièce de bois unique reliée au milieu du joug commun à deux animaux.

<sup>84</sup> Le mot « voiture » n'a pas que le sens moderne de « voiture automobile » mais englobe également les véhicules tractés par les animaux ou les humains.

Wiki commons



Bernard Normand, musée archéologique de Strasbourg



(gauche) Chariot mésopotamien à quatre roues, -2500. (droite) Chariot romain à quatre roues, 1<sup>er</sup> Siècle

## chariot

National museum of Iran



Roue à rayons, Iran, -1000

## roue à rayons

Fonds Espérandieu, Palais du Roure



Cerclage en fer, Alésia, 1<sup>er</sup>-III<sup>ème</sup> Siècle

## cerclées



Musée de Cologne

Voiture permettant le transport de riches romains

## voitures

La majeure partie des routes fut pendant très longtemps et dans de nombreuses civilisations de simples pistes en terre. Malgré tout, plusieurs civilisations de l'antiquité ont pavé quelques grandes routes stratégiques, principalement pour des raisons militaires ou commerciales, dont nous citons ci-après quelques exemples. Ainsi, les premières rues pavées remontent à la civilisation de l'Indus, mais la première route à proprement parler a été pavée en Egypte vers -2500 pour transporter des pierres lors de la construction de la pyramide de Kheops (Wilford, 1994). Les premières **routes pavées européennes** datent de la civilisation minoenne (-1700). Dans l'empire perse, une route reliant la mer Egée au golfe persique (2700 km) date de -500. Les Chinois disposaient d'un réseau de quelques grandes **routes impériales** cumulant 6500 km, construites aux environs de -200. Les Romains ont développé un réseau très important, estimé à 90000 kms, réutilisant et complétant dans les zones celtiques un réseau de routes déjà existant (Grenier, 1936 ; Ellicott, 2011). Les **routes romaines** comprenaient plusieurs couches, et étaient adaptées aux conditions géologiques et aux ressources disponibles localement; elles permettaient l'écoulement des eaux et n'étaient véritablement dallées qu'à proximité des villes. Ailleurs, le revêtement pouvait être fait de sable, galets, graviers ou de petits pavés.



minoancrete.com

Route royale en Crète, plus ancienne route d'Europe

## routes pavées européennes

china.org.cn

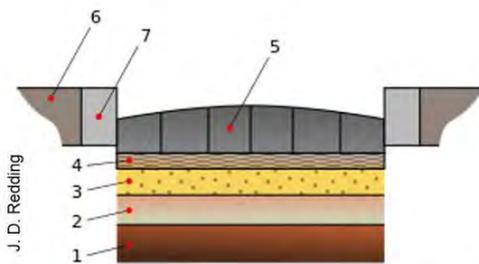


chinasgreatroads.com



Routes impériales en Chine, -200

## routes impériales



J. D. Redding

- 1). Sol nu nivelé, et éventuellement tassé.
- 2). Statumen : amas de cailloux.
- 3). Auditis : moellons agrégés par du ciment romain
- 4). Nucleus : débris de poterie agrégés par du ciment fin
- 5). Dorsum : blocs polygonaux de silex, ou blocs rectangulaires de tuf volcanique ou d'autres pierres des environs, formant la surface de la route. La forme elliptique permettait d'éviter à la pluie de stagner au milieu de la route. Le dessous des blocs était parfois volontairement entaillé leur donnant une meilleure tenue sur le nucleus.
- 6). Crepidum : trottoir ou chaussée élevée pour les piétons.
- 7). Bordure



Benoît Streppe



wiki commons

(haut) Coupe de route à Pompéi et sa légende, (bas) Via domitia à Ambrussum (gauche), et dans l'Hérault (droite)

## routes romaines

Concernant le transport maritime, l'histoire du peuplement des îles nous montre que les humains naviguaient depuis les temps les plus anciens de l'humanité, sur des embarcations dont nous n'avons retrouvé aucune trace. La première embarcation qui soit parvenue jusqu'à nous date du VIII<sup>ème</sup> millénaire et était une **pirogue** taillée dans un seul tronc d'arbre ; cette technique limitait bien entendu la taille maximale possible pour une embarcation. Des canoës en roseaux datant du VII<sup>ème</sup> millénaire ont également été mis à jour. Ensuite, de nombreux types de bateaux sont apparus dans les différentes civilisations. On trouve ainsi des canoës en peau, des radeaux flottant sur des outres, des **barques en papyrus**, roseaux, ou bottes de paille assemblées. Les plus grosses embarcations étaient faites de bois, et on en trouvait de deux types. Dans le **bateau cousu**, des planches sont assemblées et maintenues par des cordes ; les trous de passage des cordes doivent être étanchéifiés. Son inconvénient est que les cordes se dégradent et doivent être changées régulièrement. Dans un autre

type, les planches sont maintenues avec des **tenons et des mortaises**<sup>85</sup>, ce qui implique un temps de fabrication plus long, mais un assemblage plus durable et plus robuste (G. Boetto, 2014). A partir d'environ +300, apparut en Scandinavie une technique différente de fabrication de coque, la **construction à clins**. Dans cette dernière, les planches de la coque ont un léger recouvrement, donnant à la surface du bateau une forme d'escalier. Dans les bateaux retrouvés, des rivets de fer étaient utilisés pour maintenir les planches. Dans les cas où les coques devaient être imperméabilisées, différents matériaux étaient utilisés: bitume<sup>72</sup>, poix<sup>73</sup> miel, laine, ou étoupe<sup>80</sup>, par exemple.

Direction des musées de France



## pirogue

*Pirogue monoxyle, Charente, IV<sup>ème</sup> millénaire*

droits réservés



## barques en papyrus

*Bateau en papyrus, Ethiopie contemporaine.*

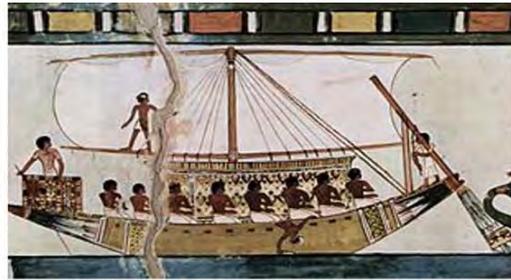
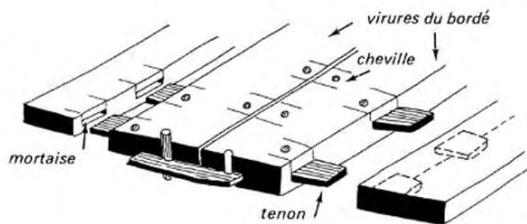


*Reconstruction d'une barque grecque cousue, -500. La construction nécessite 5 km de fil de lin et 10000 chevilles. L'étanchéité se fait à l'aide de cire d'abeille et de poix. Aucun clou ou vis n'est utilisé.*

## bateau cousu

<sup>85</sup> Les tenons sont des petits rectangles de bois qui s'encastrent dans des trous (les mortaises) percés sur le côté des planches.

M. Rival, CNRS/CCJ



(gauche) Principe de l'assemblage par tenons et mortaises. (droite) Bateau égyptien, tombe de Menna, -1400, et sa reconstitution.

marine-antique.net



## tenons et des mortaises

José Lopez



www.nydami.itu



(gauche) Principe de la construction à clins. (droite) Drakkar (bateau de Nydam), 23 m, 3 tonnes, +300. Premier exemple de construction à clins.

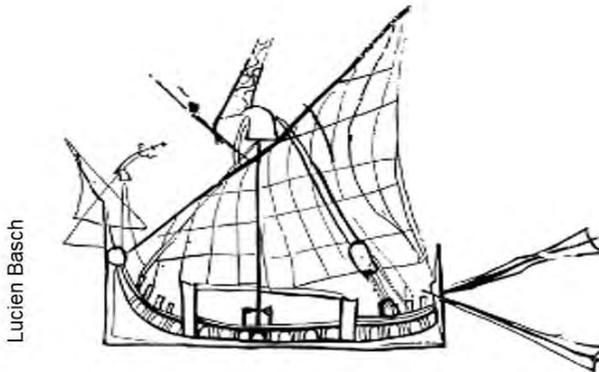
## construction à clins

La direction du bateau était assurée par une ou deux **rames** plantées dans l'eau à l'arrière du bateau. Parfois, une paire de rames étaient rendues parallèles et solidaires à l'aide d'une traverse. La manœuvre de ces gouvernails était difficile et limitait la taille maximale des bateaux. En dépit de cela, les plus gros bateaux de commerce grecs ou romains pouvaient atteindre 40 m et transporter jusqu'à 500 tonnes de marchandises (Pomey, 1997). A l'exception précisément des plus gros bateaux de commerces, qui étaient dépourvus de rames, la plupart des bateaux de l'antiquité étaient dotés de rames complétées par des voiles d'appoint (Duval, 1949). La voile classique de l'antiquité était rectangulaire ou trapézoïdale, et perpendiculaire à l'axe du bateau. Elle permettait de remonter partiellement le vent, en la manipulant astucieusement, mais ne permettait pas de suivre une route lorsque le vent était vraiment contraire (Pomey, 1996). La **voile latine** triangulaire qui, elle, permet de remonter le vent, apparut au VII<sup>ème</sup> siècle en Egypte, et fut largement utilisée par la suite dans les empires byzantin et islamique (Basch, 1991).



Maquette de navire de commerce romain, +300, 30m, 250 tonnes de marchandises. Les rames-gouvernail sont visibles à l'arrière.

## rames

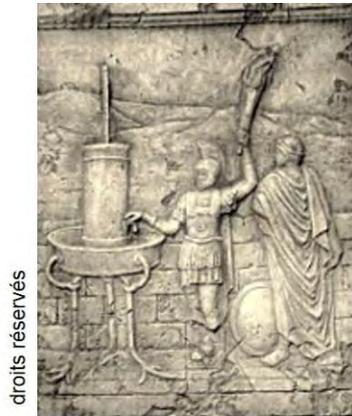


Première représentation de voile « latine » (triangulaire), dessin sur amphore, Egypte, VII<sup>ème</sup> Siècle

## voile latine

Enfin, des systèmes de transmission d'information plus rapides que des humains ou des chevaux ont été développés par les différentes civilisations, principalement pour des usages militaires ou liés à la sécurité (Sterling, 2008). Les moyens les plus anciens, mais dont la datation est incertaine, sont les moyens acoustiques (chants, cris, sifflets, tambours, trompettes), qui ont une portée limitée. Deux types de signaux optiques, également très anciens, peuvent être transmis à plus longue distance : les signaux de fumée et les feux. L'utilisation de ces derniers est mentionnée dans les plus anciens écrits grecs (l'Iliade, -700). En utilisant un signal optique, les Grecs avaient mis au point un **télégraphe hydraulique**, qui date d'environ -350 : les deux personnes en communication disposaient chacune d'un récipient rempli d'eau, qui pouvait s'écouler ; le temps d'écoulement de l'eau correspondait à un message donné,

indiqué par l'intermédiaire d'un flotteur. A l'aide de torches, l'émetteur indiquait au récepteur quand commencer à faire couler l'eau, et quand l'arrêter, permettant ainsi de transmettre le message. Les Romains avaient également mis au point un système d'encodage de leur alphabet qui nécessitait l'utilisation de plusieurs torches pour la transmission. Enfin, les **pigeons** voyageurs, dont l'utilisation pour envoyer des messages date au moins des Egyptiens, mais est probablement antérieure, furent également très utilisés (Kistler, 2011). Les Grecs diffusèrent ainsi par leur intermédiaire le nom des vainqueurs des premiers jeux olympiques (-776) et l'empereur chinois, en -500, recevait également ainsi des nouvelles de ses provinces.



droits réservés

## télégraphe hydraulique

*Télégraphe hydraulique grecque d'Aenas (-350)*



droits réservés



Shutterstock.com, 51669634

*(gauche) Lâcher de pigeons, temple de Medinet Habou, Egypte, -1300. (droite) Homme utilisant un pigeon pour l'envoi d'un message, basilique d'Aquilée, Romains, +300.*

## pigeons

## **J. La médecine**

Schématiquement, on peut considérer la médecine comme l'ensemble des actions et produits liés à la prévention, au diagnostic, à la chirurgie, et aux traitements. Concernant ces derniers, la médecine occidentale moderne s'appuie énormément sur les médicaments, dont l'action curative doit être supérieure à celle d'un placebo, afin d'être considérés comme tels. Comme nous le verrons plus loin, les médecines anciennes et traditionnelles s'appuient également sur un ensemble de pratiques que, faute de mieux, on qualifiera de *rituels*. De forme extrêmement variée, leur efficacité thérapeutique, quand elle existe, est due à la confiance accordée au médecin et à l'autosuggestion, et sont donc des placebos, ce qui n'enlève rien à leur intérêt pour le traitement d'un patient. Les pharmacopées antiques comportaient toujours plusieurs centaines, voire quelques milliers de produits naturels (plantes, animaux, minéraux) dont l'efficacité contre les maux pour lesquels ils étaient utilisés est parfois difficile à évaluer. Il y a très clairement des produits aux effets intéressants dans ces pharmacopées, mais également des produits sans effets ou dangereux. Toutes les substances utilisées pouvaient bien entendu également entraîner un effet placebo, et il était pour cette raison en général préférable pour les médecins antiques de donner ces produits que de ne rien faire, sauf lorsque les traitements étaient vraiment nocifs. Néanmoins, dans la suite de ce livre, quand nous citerons quelques exemples de traitements, sauf mention contraire, il s'agira de produits dont les études scientifiques modernes ont montré des effets pharmacologiques significatifs, et qui avait donc probablement un effet curatif supérieur à celui d'un placebo.

La médecine est une pratique extrêmement ancienne et probablement consubstantielle aux humains. On peut noter que le fait de consommer certaines plantes à visée préventive ou curative est une pratique que l'on retrouve chez plusieurs animaux (dont les primates), mais également chez des animaux non culturels tels que les insectes. Dans certaines cultures traditionnelles, les plantes médicinales utilisées sont les mêmes que celles utilisées par des animaux à proximité, montrant certainement une imitation. On peut donc imaginer que l'utilisation des plantes à visée thérapeutique par les premiers humains résulte à la fois de leur statut de primate, de l'imitation d'autres animaux, et de leurs propres expériences. Ainsi, l'utilisation de plantes médicinales a été mise en évidence chez l'homme de Néandertal, même si elle est peut-être plus ancienne (Hardy, 2012). En ce qui concerne la chirurgie, la **trépanation**<sup>86</sup> est une pratique dont on a retrouvé des traces remontant à l'âge de pierre, et les premières preuves d'**amputation** remontent au Néolithique (-4800). Dans de nombreux cas, les opérés avaient survécu, indiquant que les chirurgiens

---

<sup>86</sup> La trépanation consiste à pratiquer une ouverture dans la boîte crânienne.

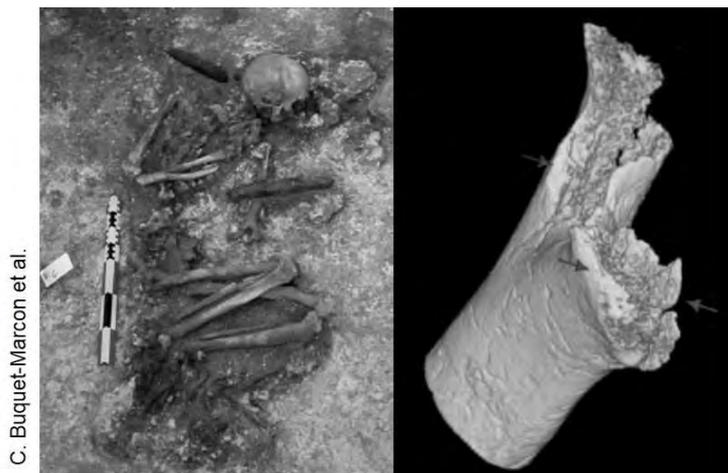
utilisaient probablement des produits empêchant l'infection des plaies (Buquet-Marcon, 2007 ; Sicard, 2011).

Muséum d'Histoire Naturelle de Lausanne



*Jeune fille trépanée au silex et ayant survécu à l'opération (-3500)*

## trépanation



C. Buquet-Marcon et al.

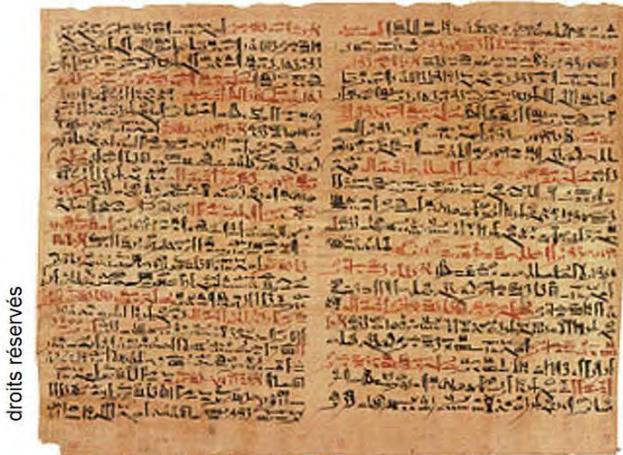
## amputation

*Amputation d'un bras suite à une blessure, Paris, -4800*

Nous allons maintenant présenter une vision synthétique de la médecine dans l'Antiquité (Mercier, 2014). Nous ne nous attarderons pas sur les théories expliquant l'origine des maladies, ou justifiant les traitements : compte tenu des faibles connaissances concernant le fonctionnement du corps et des traitements à ces époques, ces théories ne présentent que peu d'intérêt.

L'une des plus anciennes traces écrites de pharmacopée provient de la civilisation égyptienne et date de -1500 (**papyrus d'Edwin Smith**). Elle est très riche (plus de 800 remèdes) et comporte des végétaux (orge, dattes, figes, ail, cumin, origan, ...), ou des produits en étant issus (goudron, gommés,...), des

produits animaux (graisse, fiel<sup>87</sup>, viscères, excréments d'animaux, urine, sang, ...) et des produits minéraux (argile, natron, galène<sup>88</sup>, sel, malachite<sup>89</sup>,...). Ces produits pouvaient être mélangés à de la bière, du lait ou du miel et utilisés comme médicaments ou pansements. Ces traitements étaient le plus souvent associés à des incantations et l'efficacité thérapeutique d'un grand nombre d'entre eux est assez douteuse. On trouve néanmoins des exemples de produits aux effets pharmacologiques reconnus, utilisés à bon escient : le ricin en tant que laxatif, la coriandre ou la levure de bière pour les problèmes digestifs, les racines de grenades contre les parasitoses intestinales, l'alun comme désinfectant, du natron pour éloigner les vermines de la maison ou des extraits de foie pour des **traitements ophtalmologiques**, par exemple (Aboelsoud, 2010). La chirurgie était parfaitement rationnelle et ne faisait qu'exceptionnellement appel à la magie. Elle comportait de nombreux **instruments spécifiques** (scalpels, forceps, crochets, ciseaux, speculum, etc). Les chirurgiens employaient de la charpie<sup>90</sup> pour stopper les hémorragies, des tampons et des bandages ; ils effectuaient des points de suture et posaient des attelles. La cicatrisation des blessures était favorisée en les recouvrant de viande fraîche puis, le lendemain, de charpie imbibée de miel – aux propriétés antiseptiques – et de graisse. On peut noter que les médecins utilisaient une décoction de saule en tant que désinfectant, une solution ammoniaquée pour calmer l'inflammation, et des sels de cuivre pour leurs propriétés astringentes<sup>91</sup> (Breasted, 1960).



Papyrus d'Edwin Smith, premier traité de chirurgie, -1500.

## papyrus d'Edwin Smith

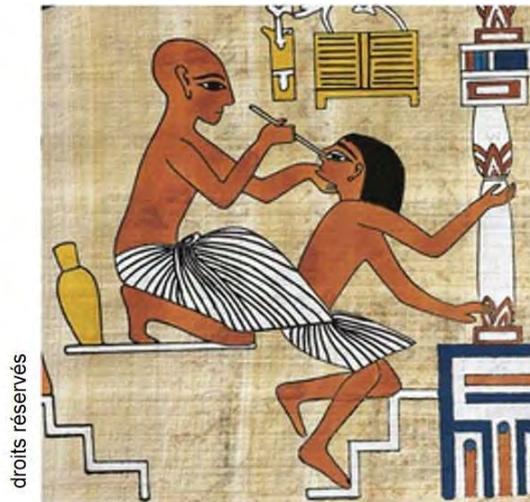
<sup>87</sup> Le fiel est un liquide produit par le foie et utile à la digestion.

<sup>88</sup> La galène est une roche composée de sulfure de plomb (PbS).

<sup>89</sup> La malachite est une roche verte composée de carbonate de cuivre  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ .

<sup>90</sup> La charpie est un agglomérat de fils servant à faire des pansements.

<sup>91</sup> Les produits astringents conduisent à un resserrement des tissus.



droits réservés

Traitement ophtalmique, tombe de Ipi, -1900

## traitements ophtalmologiques



droits réservés

Bas relief du temple de Kom Ombo (+200): scalpels, forceps, speculum, crochets, ciseaux, etc.

## instruments spécifiques

Les pharmacopées similaires à celle décrite pour la civilisation égyptienne étaient présentes dans toutes les civilisations anciennes. Elles présentaient bien entendu à chaque fois des spécificités, notamment en raison des plantes, des animaux, ou des minéraux locaux. Certaines plantes médicinales furent d'ailleurs l'objet d'un commerce ou bien simplement incorporées dans la pharmacopée d'autres civilisations lorsqu'elles étaient disponibles localement.

En Inde, les textes anciens sont à l'origine de la médecine ayurvédique, encore pratiquée de nos jours. Les datations de ses textes fondateurs sont

incertaines, et leur écriture s'étale probablement entre -1000 et +600. La médecine ayurvédique avait une approche à la fois scientifique et religieuse; elle insistait sur la prévention des maladies par l'exercice, l'hygiène et la nutrition, et étudiait surtout l'effet des médicaments sur l'organisme (Rao, 1966). Concernant la pharmacopée, on peut noter par exemple l'usage de *nardostachys jatamansi*, de la famille de la valériane, dans le traitement des maladies cardiaques, et de *boerhaavia diffusa* pour de nombreux usages, notamment diurétiques (Mahesh, 2012). Un recueil datant de -600 indique que la chirurgie ayurvédique était particulièrement sophistiquée à cette époque. Plus d'une centaine d'**instruments** (couteaux, ciseaux, seringues, crochets, forceps, trocars<sup>92</sup>, aiguilles, etc) et 300 opérations chirurgicales y sont décrits. Parmi ces dernières, on peut citer l'ablation des amygdales, les amputations, l'excision, l'opération de la cataracte par abaissement du cristallin<sup>93</sup>, la saignée, l'extraction de dents, la pose de drains, l'ablation de la prostate, la césarienne, et enfin diverses opérations : fistules anales<sup>94</sup>, perforations intestinales, hernies ou hémorroïdes. Les sutures étaient réalisées à l'aide de tendons, cheveux ou soie. On utilisait également des têtes de fourmis pour suturer les intestins. La cautérisation thermique et chimique<sup>95</sup>, ainsi que la ligature des vaisseaux, étaient pratiquées (Saraf, 2006 ; Rao, 1966). Les premières techniques de chirurgie plastique y sont également décrites: réparation de lobes d'oreilles déchirés, **rhinoplastie**<sup>96</sup> (destinée à reformer un nez aux personnes condamnées à des mutilations), réparation des becs-de-lièvre, etc. Le vin était utilisé pour réduire la douleur ressentie par les patients. L'entraînement des étudiants aux incisions se faisait sur des légumes, et l'étude de cadavres était courante. Cette expertise très ancienne en chirurgie s'est ensuite perdue, pour des raisons qui font l'objet de débats, notamment en Inde (Rao, 1966).

---

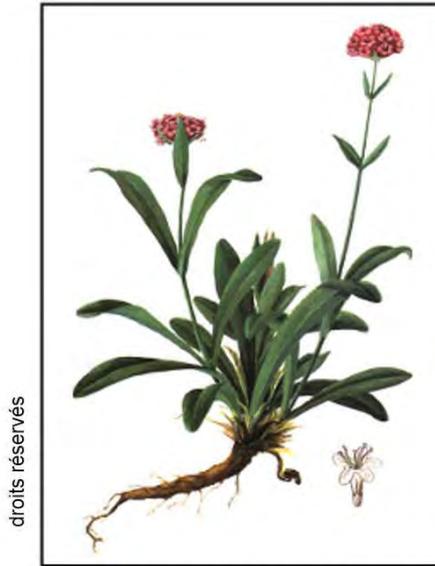
<sup>92</sup> Le trocart est un instrument composé d'un cylindre fin et creux servant à faire des prélèvements.

<sup>93</sup> La cataracte est due à une opacification du cristallin. En faisant descendre ce dernier, une partie de la vision est retrouvée.

<sup>94</sup> Une fistule anale est une communication anormale entre l'intérieur du canal anal et l'extérieur, due à une infection, et devant être opérée.

<sup>95</sup> La cautérisation consiste à boucher des veines ou vaisseaux sanguins en détruisant leurs cellules, soit par chauffage, soit par l'action d'un produit chimique.

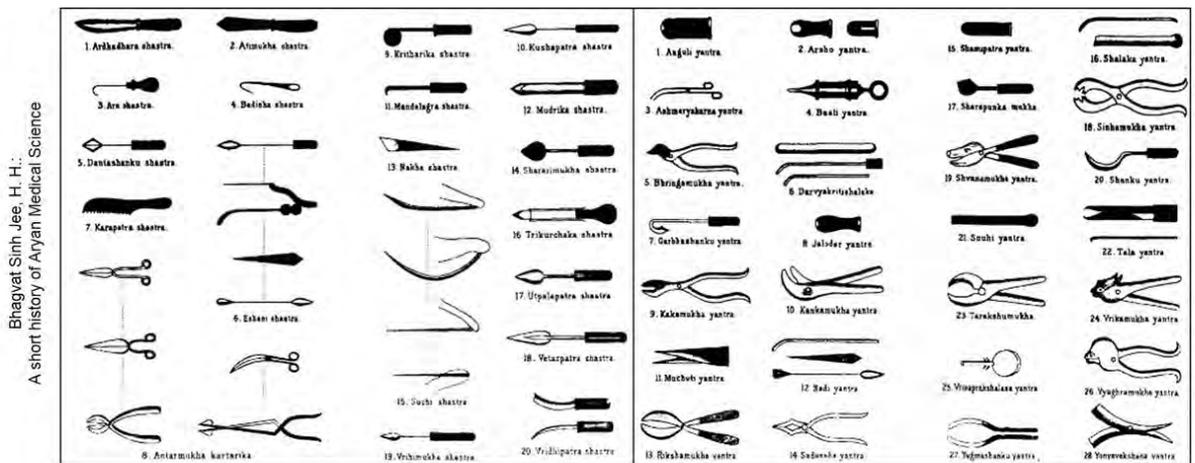
<sup>96</sup> La rhinoplastie est la chirurgie plastique du nez.



droits réservés

**nardostachys jatamansi**

*Nardostachys jatamansi*, de la famille de la valériane (connue pour ses propriétés sédatives et anxiolytiques)



Bhagvat Singh Jee, H. H.:  
A short history of Aryan Medical Science

Illustration d'instruments utilisés par Sushruta (Inde, -600).

**instruments**

« Rhinoplastik », 1818

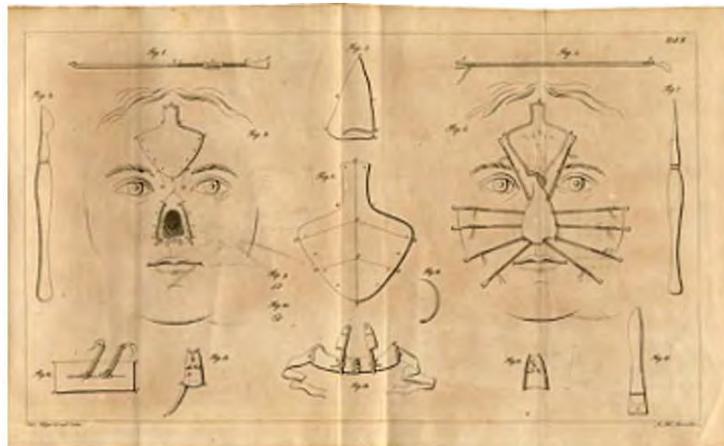


Illustration de la technique indienne de rhinoplastie, décrite par Karl Ferdinand von Graefe en 1818.

**rhinoplastie**

La médecine chinoise antique utilise l'acupuncture (II<sup>ème</sup> siècle) ou la moxibustion<sup>97</sup>, deux pratiques qui n'ont pas prouvé leur effet par rapport à un placebo, et peuvent donc être considérées comme des rituels. La pharmacopée chinoise est extrêmement vaste, contenant plus de 2000 préparations, dont beaucoup contiennent des éléments d'origine animale à l'efficacité non prouvée. On trouve malgré tout un certains nombres de produits d'intérêt parmi les plantes utilisées. Par exemple, l'éphédra, une plante contenant de l'éphédrine<sup>98</sup>, était utilisée contre l'asthme (Chastel, 2004).

La médecine grecque occupe une place importante, et a influencé toute la médecine ultérieure. Jusqu'au VIII<sup>ème</sup> siècle avant J.C, elle resta aux mains des prêtres, une grande importance étant accordée aux prières, sacrifices, et à l'interprétation des songes pour prédire les traitements. C'est seulement après cette période que se développèrent plusieurs écoles cherchant à avoir une approche plus rationnelle. Hippocrate est issu de l'une d'entre elles et ses travaux, datant du V<sup>ème</sup> siècle avant JC, auront une grande renommée. Dans cette nouvelle approche de la médecine, d'où sont exclues magie et divination, une grande importance était apportée aux diagnostics, à l'observation minutieuse, et aux expériences, conduisant à une bien meilleure identification des maladies. Pour traiter, on utilisait saignées, purgatifs, vomitifs, fomentations<sup>99</sup>, boissons (notamment la ptisane<sup>100</sup>), aliments, bains, régimes et médicaments. Dans de nombreux cas, l'efficacité de ces traitements, notamment celle des saignées et des purges, est douteuse. Néanmoins, certains produits issus de la pharmacopée, souvent connus depuis longtemps, étaient efficaces. Par exemple, belladone, opium, mandragore et jusquiame étaient utilisés comme sédatif, notamment pour les opérations chirurgicales (Dachez, 2012), et le cuivre était utilisé pour prévenir l'infection des plaies. Une description détaillée de la pharmacopée grecque a été publiée dans un ouvrage qui, là encore, fera référence pendant de nombreux siècles, « *De Materia Medica* », écrit par Dioscoride au cours du I<sup>er</sup> siècle de notre ère, et qui comporte plus de 600 produits et médicaments. Un des médicaments issu de la pharmacopée grecque qui eut une grande et longue renommée – jusqu'à la fin du Moyen Âge – est la thériaque. A l'origine traitement contre les morsures de serpent, on lui rajouta de plus en plus d'ingrédients, de manière à la transformer progressivement en anti-poison universel, puis en panacée<sup>101</sup>, ce qu'elle n'était évidemment pas. Sa formulation finale comportait une soixantaine d'ingrédients, dont de l'opium (Parajcic, 2003).

La dissection des cadavres est une pratique qui n'a été autorisée que pendant une cinquantaine d'années, à Alexandrie, aux environs de -300, et a permis à deux médecins, Hérophile et Erasistrate, de décrire précisément

---

<sup>97</sup> Pratique qui consiste à brûler des plantes sur les points d'acupuncture.

<sup>98</sup> L'éphédrine est une molécule puissante, ayant des effets anti-asthmatiques, mais également stimulants, psychotropes et vaso-constricteurs. Elle peut facilement être transformée en méthamphétamine.

<sup>99</sup> La fomentation consiste à appliquer des substances chaudes sur le corps.

<sup>100</sup> La ptisane est une boisson à base d'orge.

<sup>101</sup> La panacée est un remède universel, agissant contre toutes les maladies.

l'intérieur du corps humain et de mieux comprendre le rôle des différents organes. On a par exemple compris à cette époque le rôle des nerfs, du cœur, des reins et du cerveau. Leurs observations furent complétées par Galien, au II<sup>ème</sup> siècle de notre ère, qui réalisa des dissections de singes et des observations sur des gladiateurs. Les connaissances anatomiques obtenues durant cette période ne seront plus approfondies jusqu'au XV<sup>ème</sup> siècle (Ameisen, 2011).

La médecine grecque fut par la suite exportée et utilisée dans l'Empire Romain, sans que des apports significatifs puissent être notés. Lors de l'âge d'or de l'Empire islamique, tous les ouvrages de la médecine grecque et indienne furent traduits, étudiés, puis critiqués et enrichis, notamment par Rhazès au X<sup>ème</sup> siècle. On peut par exemple trouver dans ses écrits le traitement de l'hypoglycémie avec des instillations rectales de miel, la description précise de plusieurs maladies, quelques innovations en chirurgie, comme la trachéotomie, et l'utilisation du mercure comme agent anti-inflammatoire (Ameisen, 2011 ; George, 2011). Les traitements des maladies de l'œil ont également beaucoup progressé durant cette période, notamment la chirurgie de la cataracte (Halioua, 2001). En matière d'opération chirurgicale, il était également d'usage de faire respirer une éponge imbibée de jusquiame et cannabis avant une intervention (Dachez, 2012). Enfin, concernant la pharmacopée, de nouvelles substances furent introduites comme la **manne**<sup>102</sup> ou l'**écorce de quinquina**, utilisée pour le traitement du paludisme (Halioua, 2001). A partir du XI<sup>ème</sup> siècle, la médecine arabe stagna, mais ses écrits, ainsi que ceux des grecs, passèrent en Occident, et c'est dans cette région que de nouvelles évolutions eurent lieu, comme nous le verrons plus loin.



*La manne est une gomme issue d'incisions de frênes, aux propriétés laxatives. D'après « Yves Rocher », elle hydrate également l'épiderme.*

## **manne**

---

<sup>102</sup> La manne est une gomme suintant naturellement du frêne, ou à la suite d'une excision, aux propriétés laxatives.

wiki commons, H. Zell



## **écorce de quinquina**

*Ecorce de quinquina, contenant de la quinine, anti-paludéen.*

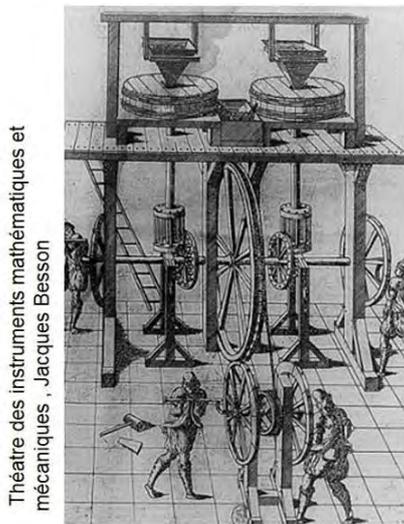
## CHAPITRE II : LE MOYEN ÂGE EN OCCIDENT

Par un souci d'unité de lieu, cette seconde partie qui doit nous mener jusqu'à la révolution industrielle relate uniquement l'histoire de l'Occident, même si l'origine de certaines techniques sera parfois mentionnée. Le Moyen Âge commence officiellement à la fin de l'Empire romain d'Occident, et a été fixé par les historiens à 476. La chute de l'Empire romain s'étale progressivement d'environ 400 à 500 et, d'après B. Ward-Perkins, s'accompagne de « changements radicaux dans la culture matérielle et les conditions de vie des personnes qui avaient auparavant vécu dans l'Empire romain » (Ward-Perkins, 2015). On peut par exemple citer la disparition du tour de poterie en Grande-Bretagne, la diminution ou disparition de la fabrication de tuiles, briques ou céramiques, la diminution de la taille de certaines villes, la baisse de la production de livres, etc. Cet effondrement fut suivi d'une période de relative stagnation jusqu'au X<sup>ème</sup> siècle. Des évolutions technologiques apparurent dans de nombreux domaines à partir de cette époque, accompagnées d'une forte hausse de population. Le XIV<sup>ème</sup> siècle fut une période de surpopulation, marquée par une famine européenne, une augmentation du nombre de lépreux, et l'épidémie de peste noire, le tout conduisant à une forte diminution de la population européenne. Du point de vue de l'histoire des techniques, la période dite de « la Renaissance », ne représente rien de particulier : la rapide évolution des techniques dans de nombreux domaines à partir du XV<sup>ème</sup> siècle n'est que la continuité de ce qui précède, et sera poursuivie par la suite. Dans la suite de ce livre, par commodité, nous utiliserons de le terme « Moyen Âge » pour désigner toute la période qui court jusqu'à la révolution industrielle, suivant en cela l'historien Jacques Le Goff. Bien que ce chapitre soit centré sur l'Occident, on peut noter que, pendant ce temps, et jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle, la Chine développait un système technologique « en avance » sur l'Occident, mais stagna par la suite.

### A. Moulins et mécanismes

Au Moyen Âge, en l'absence de machines permettant de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique, les seules sources d'énergie mécanique étaient humaines, animales, hydrauliques et éoliennes. Comme on le verra dans le Chapitre IV, les énergies éoliennes et mécaniques n'apportaient qu'un *complément* aux **énergies mécaniques humaines et animales**, car ces deux dernières restaient prépondérantes dans le bilan énergétique. Enfin, parmi

ces deux compléments, l'énergie hydraulique était plus répandue que l'énergie éolienne.

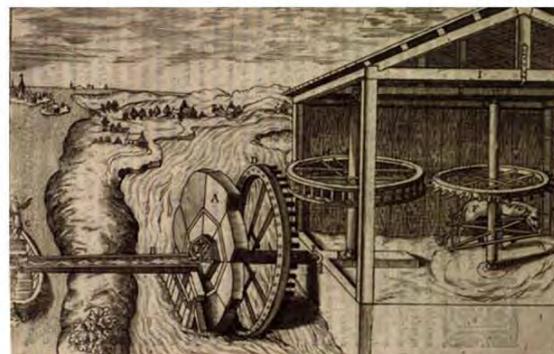


(gauche) Machine à moudre le grain, XVI<sup>ème</sup> siècle. (en haut à droite) Manège de bœufs actionnant une meule, 1607. (en bas à droite) Cheval permettant de remonter l'eau, 1607.

Novo teatro di machine et edificii, V. Zonca, 1607



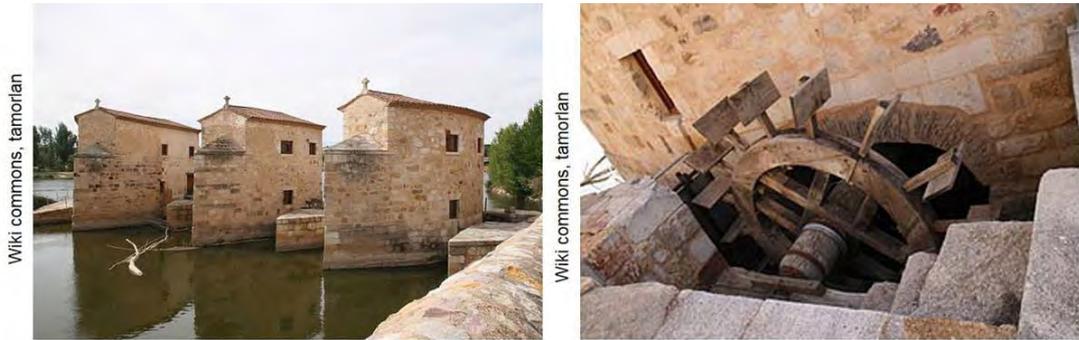
Novo teatro di machine et edificii, V. Zonca, 1607



## énergies mécaniques humaines et animales

Le **moulin à eau** a eu un rôle assez important et transversal dans les évolutions technologiques tout au long du Moyen Âge et jusqu'à la révolution industrielle, en raison de la grande variété de ses usages possibles : transformation alimentaire, métallurgie, forge, extraction minière, confection de draps et coutellerie, par exemple. Ces différents usages seront détaillés plus loin. Les moulins avaient une structure en bois, mais étaient renforcés par du métal pour certaines parties critiques. Ainsi, l'axe de la roue était cerclé de fer à l'endroit où il reposait sur un support, qui était lui-même en plomb. On doit noter que, malgré cela, le moulin devait subir de nombreuses réparations. L'importance du moulin dans la production agricole et manufacturière a suscité de nombreuses recherches sur les moyens d'optimiser leur rendement, notamment à partir du XV<sup>ème</sup> siècle. Par exemple, les premières ébauches de turbines ainsi que la démonstration de l'intérêt d'utiliser des aubes inclinées datent de cette époque. Mais ces travaux n'eurent que peu de conséquences sur les roues réellement fabriquées et leur rendement. Enfin, en dépit de recherches ayant montré au XVII<sup>ème</sup> siècle quel devait être le profil optimal des engrenages, ces travaux ne furent mis en application qu'au premier quart du XIX<sup>ème</sup> siècle, lorsque les engrenages devinrent métalliques. Les évolutions significatives dans

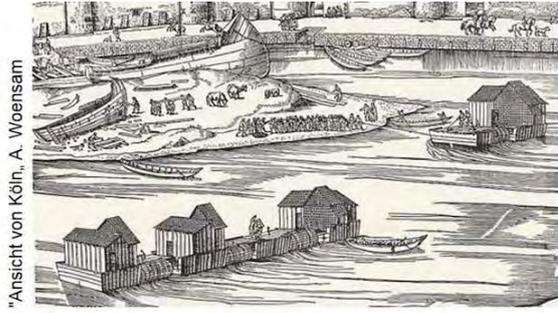
la structure et le rendement des moulins furent en fait contemporaines de la révolution industrielle, et seront détaillées dans le Chapitre IV.



*Moulins médiévaux de Zamora (Espagne), IX<sup>ème</sup>-XII<sup>ème</sup> siècle.*

## **moulin à eau**

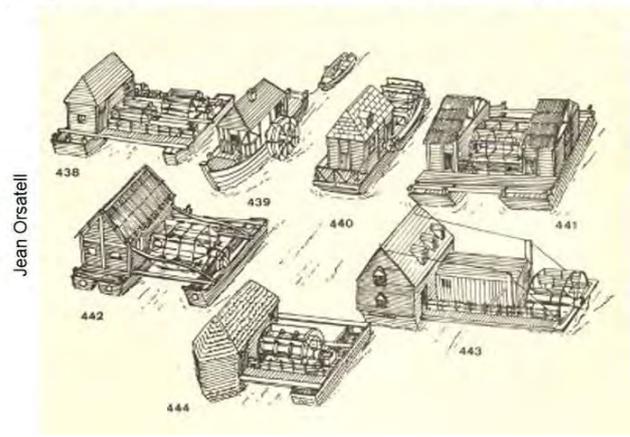
Le Moyen Âge vit l'apparition de deux nouveaux types de moulins à eau, qui n'étaient a priori pas connus dans l'Empire romain, et dont l'usage perdura jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle: le **moulin-bateau** et le **moulin de ponts** (De Decker, 2010). Le premier apparut à Rome au VI<sup>ème</sup> siècle et se répandit progressivement dans toute l'Europe. Au XII<sup>ème</sup> siècle, on en comptait plusieurs dizaines par agglomération dans les grandes villes européennes. L'intérêt principal de ce moulin est de ne pas être tributaire des variations de hauteur du cours d'eau sur lequel il est placé. Le moulin de ponts, quant à lui, apparut au cours du XII<sup>ème</sup> siècle et faisait partie intégrante du pont. La roue était placée sous une arche, ce qui permettait de profiter d'un courant plus rapide, et était dotée d'un système permettant de varier sa hauteur. Le mécanisme et la meule étaient placés dans un bâtiment construit sur le pont. L'importance exacte de ces deux moulins dans le « mix énergétique » de l'époque reste encore à évaluer. Leur nombre pourrait être équivalent à celui des moulins à vent, ce qui en ferait une source d'énergie annexe. Ils furent en grande partie utilisés pour le broyage du blé, mais très peu pour d'autres usages, contrairement à leurs homologues terrestres.



"Ansicht von Köln, A. Woensam



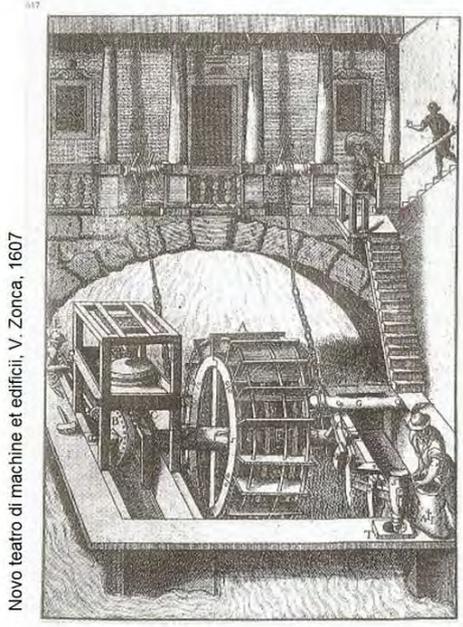
Droits réservés



Jean Orsatelli

(en haut à gauche) Moulins-bateaux sur le Rhin, XVI<sup>ème</sup> siècle. (en bas à gauche) Différents types de moulins-bateaux. (droite) Moulin-bateau sur la Garonne, XX<sup>ème</sup> siècle.

**moulin-bateau**



Novo teatro di machine et edificii, V. Zonca, 1607

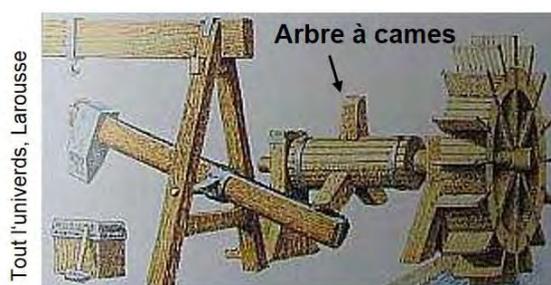


T.J.H. Hoffbauer, 1839-1922

(gauche) Moulin de pont, Padoue, Italie, XV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Moulins de pont sous le « pont des meuniers » Paris, reconstitution du XV<sup>ème</sup> siècle.

**moulin de ponts**

L'accessoire qui permet de multiplier les usages du moulin est l'**arbre à cames**, qui était déjà connu dans l'antiquité et réapparut vers le XII<sup>ème</sup> siècle. Sa première application fut le **martinet**<sup>103</sup>, utilisé dans les forges. Les moulins à foulon, qui seront présentés plus loin, étaient également basés sur ce système. Le deuxième mécanisme important est le système **bielle-manivelle**, qui permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement linéaire alternatif, et qui réapparut à la fin du XIV<sup>ème</sup> siècle. Il fut rapidement accompagné d'un volant d'inertie afin de palier à l'inconvénient de ses deux points morts. Ce système était utilisé dans plusieurs mécanismes, comme par exemple la scie hydraulique ou le rouet.



*Utilisation de l'arbre à came pour un martinet*

## arbre à cames



*Martinet dans les Forges de Pyrène, Montgailhard, Ariège.*

## martinet

<sup>103</sup> Un martinet est un lourd marteau qui retombe périodiquement sur une enclume.



*Rémouleur, Paris, 1500.*

## bielle-manivelle

L'utilisation du vent comme source d'énergie mécanique apparut à partir du IX<sup>ème</sup> siècle en Perse (Zayats, 2015). Les premiers moulins étaient des **moulins à axe vertical**, et ne nécessitaient pas d'engrenages. Les **moulins à axe horizontal** se répandirent en Europe à partir du XII<sup>ème</sup> siècle. Ces premiers moulins étaient construits sur un socle, et pouvaient pivoter pour être placés face au vent, une opération manuelle effectuée par le meunier. Les **moulins à cabine orientable**, dont seul le toit pivote, se répandirent à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle. Le fait que seul le toit ait besoin d'être orienté permettait de faire un bâtiment plus haut, éventuellement en pierre, aux ailes plus grandes, et donc plus puissants. En 1745, des **moulinets d'orientation**<sup>104</sup>, système à engrenages métalliques permettant d'orienter automatiquement les pâles face au vent, furent inventés. L'importance du moulin à vent fut plus faible que celle des moulins à eau, notamment en raison de la variabilité du vent et des difficultés techniques et humaines qui y sont donc associées. Ainsi, il fallait assurer en permanence un suivi du moulin pour l'orienter face au vent, mais également pour modifier la couverture des ailes en fonction de la vitesse du vent. Néanmoins, certaines régions à faible dénivelé et/ou dépourvues de cours d'eau réguliers (Hollande, Espagne) font exception et utilisèrent de manière significative l'énergie éolienne. Dans les autres pays, le moulin à vent était surtout une source d'énergie d'appoint lorsque les rivières étaient gelées ou à sec, ou dans les zones éloignées de rivières.

<sup>104</sup> Le moulinet d'orientation est un moulin miniature solidaire de la tête du moulin, mais orienté perpendiculairement à ce dernier. Lorsque le vent ne lui est pas exactement perpendiculaire, il tourne et entraîne un mécanisme qui fait pivoter la tête, de telle sorte que le moulin principal reste face au vent, et le moulinet perpendiculaire au vent.

Dr. Volker Theval, 1969



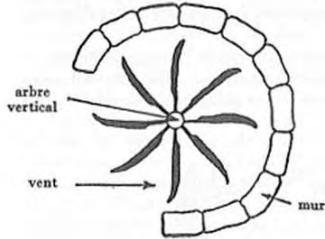
Moulin à axe vertical, Afghanistan

Mohamad Reza Shahpasand



(en bas à gauche) Schéma du moulin à axe vertical. (en haut à gauche) Moulin en Afghanistan. (droite) Moulin à Nashtifan, Iran.

Histoire des techniques,  
M. Dumas

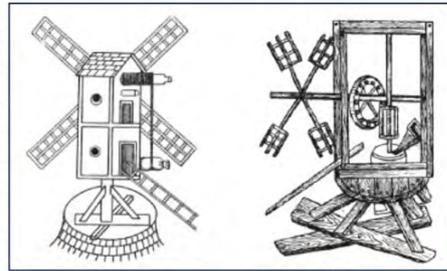


## moulins à axe vertical

Livre des comptes du Vieil Rentier  
Bibliothèque Royale – Bruxelles



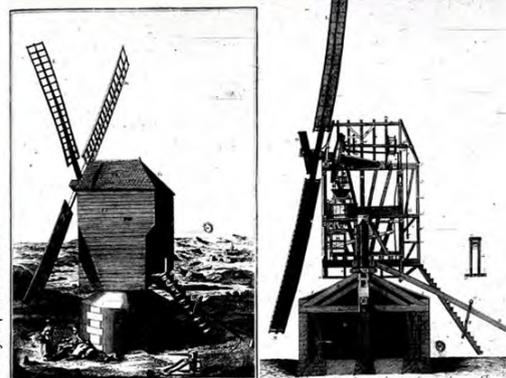
Histoire des techniques, M. Dumas



Roman d'Alexandre,  
Bodleian Library, Oxford



Encyclopédie Diderot



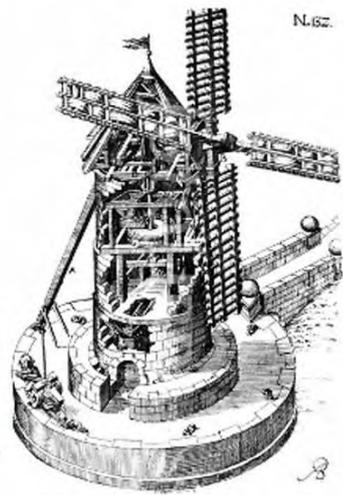
(en haut à gauche) Moulin à vent, Belgique, XIII<sup>ème</sup> siècle. (en bas à gauche) Moulin à vent, Angleterre, XIV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Moulin à vent orientable et son mécanisme, au XV<sup>ème</sup> (haut) et XVII<sup>ème</sup> (bas) siècle.

## moulins à axe horizontal

Jacob Isaakszoon van Ruysdael



Agostino Ramalli, 1588



(gauche) Moulin à vent à cabine orientable, Pays-Bas, XVII<sup>ème</sup> siècle. (droite) Moulin à vent à cabine orientable, XVI<sup>ème</sup> siècle.

## moulins à cabine orientable

agencedesplages.com



Moulinet d'orientation, Kébroué (France), 1745

## moulinets d'orientation

### **B. Agriculture et élevage**

La période qui nous intéresse ici a été l'objet d'une augmentation de la productivité agricole à l'hectare, que l'historiographie française a coutume de narrer sous la forme de deux « révolutions agricoles », ce que nous ferons également ici. Cette forme de récit ne doit pas nous faire oublier qu'une augmentation de productivité à l'hectare n'est pas synonyme d'une augmentation de productivité par heure travaillée, et que cette augmentation des rendements à l'hectare s'est très probablement accompagnée d'une augmentation significative de la quantité de travail des paysans, notamment des femmes (Ferault, 2012 ; Mahlerwein 2002). Comme souligné par G. Mahlerwein au sujet d'études sur l'intensification agricole allemande dans la période XVII-XIX<sup>ème</sup> siècle : « La démographie historique a mis en évidence

l'augmentation de la charge de travail des femmes à partir de la réduction des intervalles intergénéraliques liées à la diminution du temps d'allaitement que provoquait la multiplication des tâches ». Une discussion plus approfondie et générale sur l'intensification agricole sera présente dans le Tome II.

Avant d'aborder les évolutions ayant eu lieu au cours du Moyen Âge, il nous apparaît intéressant de donner quelques chiffres, sur le **système agricole traditionnel** à la fin de l'empire romain et au début du Moyen Âge. Nous présenterons également un aperçu des types de cultures, animaux élevés, et quelques données sur la pêche.



Wikicommons, D. Villafueta



(gauche) Paysan labourant à l'araire, Espagne, XIII<sup>ème</sup> siècle. (droite) Araire et ses reilles en fer, Drome, V<sup>ème</sup> siècle.

## système agricole traditionnel

S'il va de soi que les pratiques agricoles dépendaient énormément des régions, du sol et des cultivateurs, on peut néanmoins dresser quelques grandes lignes. Le système le plus répandu était basé sur une rotation biennale des cultures, avec une jachère ou une légumineuse en alternance avec une céréale, sur l'utilisation de l'araire, tiré par des bœufs, et enfin sur une utilisation modérée du fumier, dont la collecte était rendue difficile par le vagabondage des animaux et l'absence de moyens de transport adaptés. D'autres méthodes d'enrichissement étaient parfois utilisées : fumier de pigeons, marnage<sup>105</sup>, vases, chaulage<sup>106</sup> des prairies, apport de végétaux. Dans ces conditions, au XVI<sup>ème</sup> siècle, le rendement en blé en Europe était d'environ 400-500 kg/ha (Kander, 2013). Ceci permettait à une famille de paysans de 5 personnes de pouvoir se nourrir en exploitant une superficie d'environ 5-10 ha. Dans cette superficie, environ 1/3 était laissé en jachère, et une part importante était également dévolue aux pâturages pour les animaux, nécessaires pour la production de fumier et le travail des champs. Il fallait également prendre en compte les

<sup>105</sup> La marne est une roche tendre contenant du calcaire, de l'argile et du sable.

<sup>106</sup> Le chaulage consiste à étendre de la chaux.

besoins en bois, non comptabilisés dans cette superficie, et qui étaient principalement couverts par les droits d'usage<sup>107</sup>.

A cette époque, la plupart des semis de céréales se faisaient avec un mélange de graines, afin de multiplier les chances de succès. L'outil principal de récolte était la **faucille** et le battage s'effectuait au **fléau**. Les féculents consommés étaient principalement les glands, faines<sup>108</sup> et châtaignes. Les huiles étaient issues du colza, du lin, de l'œillette et des olives. Les différents animaux élevés étaient les cochons, les moutons, les chèvres, les volailles, les bœufs et les chevaux, le porc constituant la principale viande consommée par la population. Ces animaux étaient nourris par pâturage dans les forêts (surtout les **porcs**), sur les jachères, et par certains produits issus de l'agriculture (avoine, pois, foin, fèves, orge). Les ressources étaient néanmoins souvent insuffisantes pour que les animaux soient correctement nourris, et il n'était pas rare qu'ils soient sacrifiés à l'approche de l'hiver, faute de réserves suffisantes.



Récolte à la faucille (XIII<sup>ème</sup> siècle)

## faucille

---

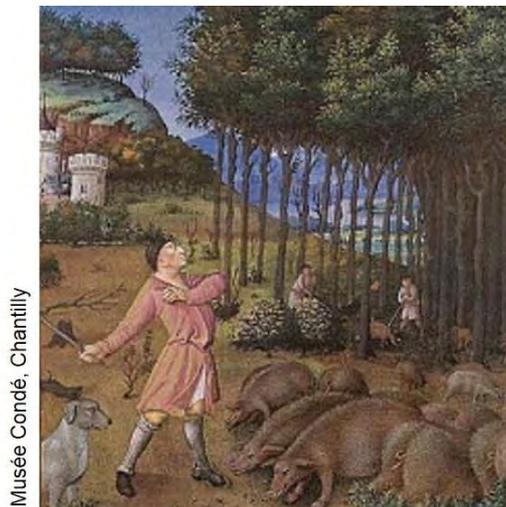
<sup>107</sup> Les droits d'usage, en l'occurrence, désignent l'ensemble des autorisations de prélèvements de bois donnés aux habitants d'une région sur les forêts avoisinantes, et dont ils ne sont pas propriétaires.

<sup>108</sup> La faine est le fruit du hêtre.



*Battage au fléau (XIII<sup>ème</sup> siècle)*

## fléau

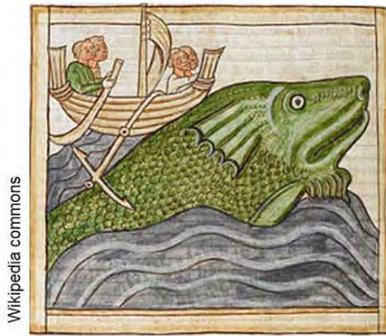


*Porcs amenés à la glandée dans les forêts (XV<sup>ème</sup> siècle)*

## porcs

En raison de la faible production de viande, la **pêche** avait au Moyen Âge une place importante. Les poissons étaient également recherchés pour leur huile. De multiples espèces étaient pêchées, aux filets ou à la ligne: harengs, sardines, thon, morue, cabillaud, églefins, colins, turbots, phoques, marsouins, baleines, etc. Les poissons étaient conservés par salaison ou séchage. Ainsi, le hareng salé a été vendu dans toute l'Europe en grande quantité. La salaison est à l'origine de la grande importance du sel à cette époque, qui était obtenu par évaporation naturelle d'eau de mer, ou parfois en utilisant des chaudières, dans les pays à faible ensoleillement. Enfin, de nombreux **viviers**<sup>109</sup> et étangs furent également aménagés, et étaient régulièrement réapprovisionnés.

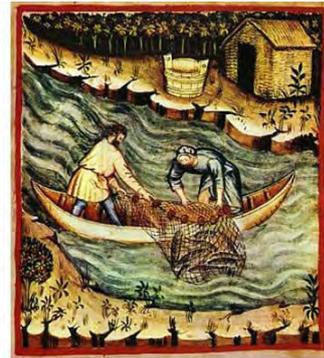
<sup>109</sup> Réservoirs ou étangs artificiels où étaient conservés poissons et crustacés.



Wikipedia commons



BNF



Wikipedia commons

## pêche

(gauche) Pêche à la baleine, XIII<sup>ème</sup> siècle. (milieu) Pêche à la lamproie, XIV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Pêche en rivière, XIV<sup>ème</sup> siècle.



Wikipedia commons, J.-M. Rosier

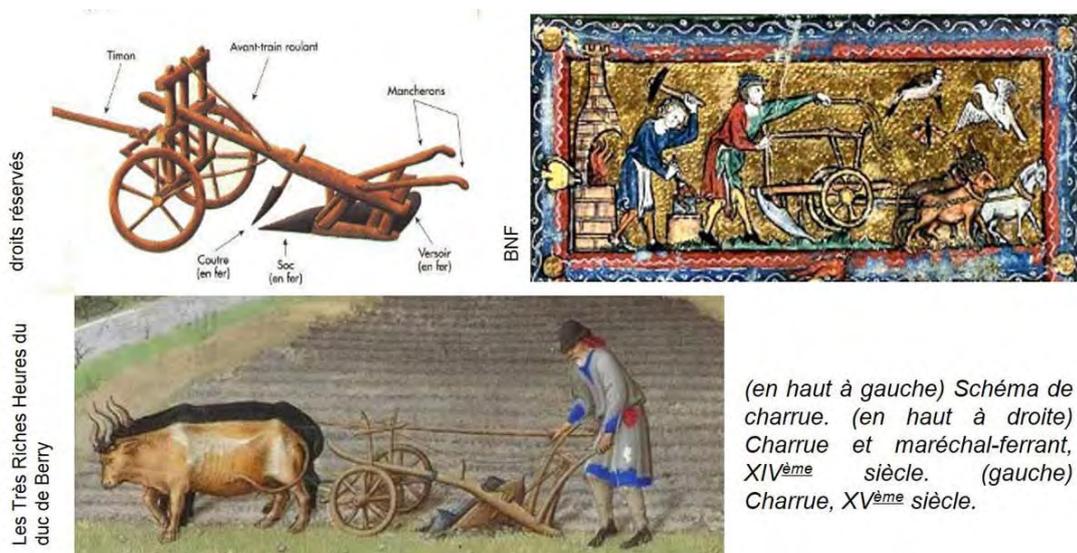
## viviers

Vivier, Palais des Papes, XIV<sup>ème</sup> siècle.

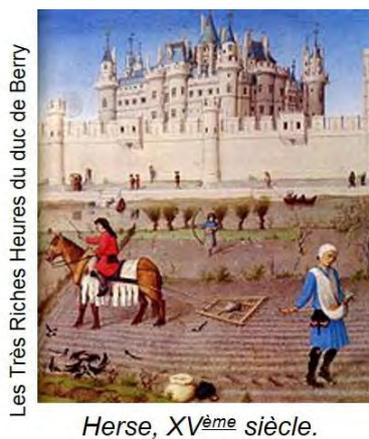
Jusqu'au X<sup>ème</sup> siècle, le système agricole décrit plus haut perdura à peu près à l'identique, avec une population plus ou moins constante. A partir du X<sup>ème</sup> siècle, le système technique agricole évolua, utilisant plusieurs nouvelles techniques combinées, dont la première est la **charrue** (Bertrand, 1962). Les premières évolutions vers ce nouvel instrument agricole apparurent au X<sup>ème</sup> siècle dans la région de la République Tchèque, lorsque le soc de l'araire devint dissymétrique. Elle évolua lentement vers la charrue lourde, équipée de roues, au XIII<sup>ème</sup> siècle. Contrairement à l'araire, elle permet de creuser un sillon profond, et surtout de retourner la terre, enterrant les herbes, à l'aide d'un système recourbé appelé versoir. Elle était particulièrement adaptée aux sols gras du Nord de l'Europe. Elle est généralement associée à la **herse**, qui permet de briser les mottes produites par le passage de la charrue. En parallèle, l'utilisation de la **faux** se répandait progressivement, et permettait de récolter du foin sur les zones en jachère. Le foin permettait de nourrir les animaux qui étaient gardés en stabulation<sup>110</sup> pendant l'hiver, et donc d'augmenter la quantité de fumier récoltée. L'installation de fers cloués aux chevaux, qui date du IX<sup>ème</sup> siècle, combinée à l'utilisation de charrettes, rendait l'utilisation du cheval rentable par rapport au bœuf, facilitant entre autres le transport du fumier et du foin de l'étable vers les champs. L'enrichissement de la terre permit à cette

<sup>110</sup> La stabulation est le séjour des animaux en étable.

dernière de supporter le passage d'un assolement biennal à un **assolement triennal**<sup>111</sup>, conduisant à une augmentation de la production. De plus, l'avoine était une très bonne céréale à cultiver en hiver dans ce nouveau système, ce qui permettait d'avoir plus de céréales à fournir aux chevaux. On voit que ces différents éléments s'assemblent et se complètent de manière cohérente, conduisant au XI<sup>ème</sup> siècle à un nouveau système, dans lequel les rendements à l'hectare étaient à peu près doublés par rapport au système précédent. Une exploitation de 7 à 8 ha devenait alors suffisante pour nourrir une famille.



## charrue



## herse

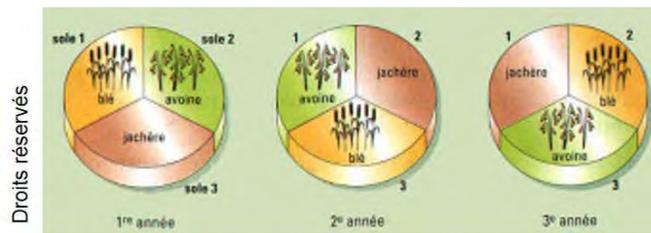
<sup>111</sup> L'assolement triennal consiste à cultiver une céréale d'hiver, puis une de printemps et laisser le champ en jachère la troisième année.

Les Très Riches Heures du duc de Berry



Faux et maréchal-ferrant, XIV<sup>ème</sup> siècle.

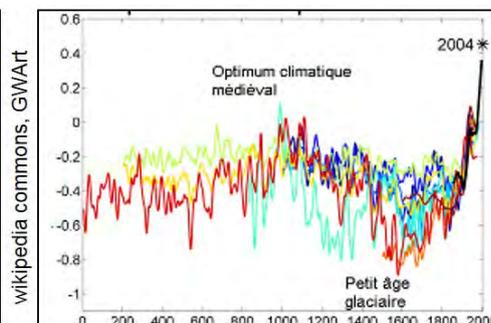
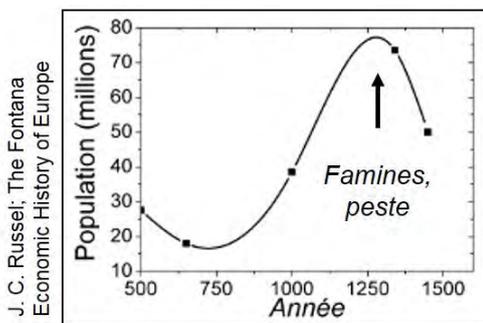
**faux**



Principe de l'assolement triennal

**assolement triennal**

Cette évolution des techniques agricoles permet d'expliquer en partie la forte augmentation de population qui a eu lieu en Europe entre le X<sup>ème</sup> et le XIII<sup>ème</sup> siècle, mais il en existe deux autres. La première est une légère **hausse des températures moyennes** durant cette période, qui a conduit à une augmentation temporaire des rendements. La seconde est l'extension des surfaces cultivées, par **défrichage** et par assèchement des marais. Le défrichage a profité d'un outillage en fer mieux adapté et plus répandu. L'assèchement avait débuté au XIII<sup>ème</sup> siècle, mais prit une plus grande importance à partir du XV<sup>ème</sup> et XVI<sup>ème</sup> siècle, notamment en Hollande, où des moulins à vent combinés à des vis d'Archimède furent utilisés pour puiser l'eau. Des travaux similaires permirent de gagner dans de nombreuses régions d'Europe des surfaces arables.



(gauche) Evolution de la population européenne. (droite) Evolution des températures passées, issue d'une compilation de plusieurs sources scientifiques.

**hausse des températures moyennes**



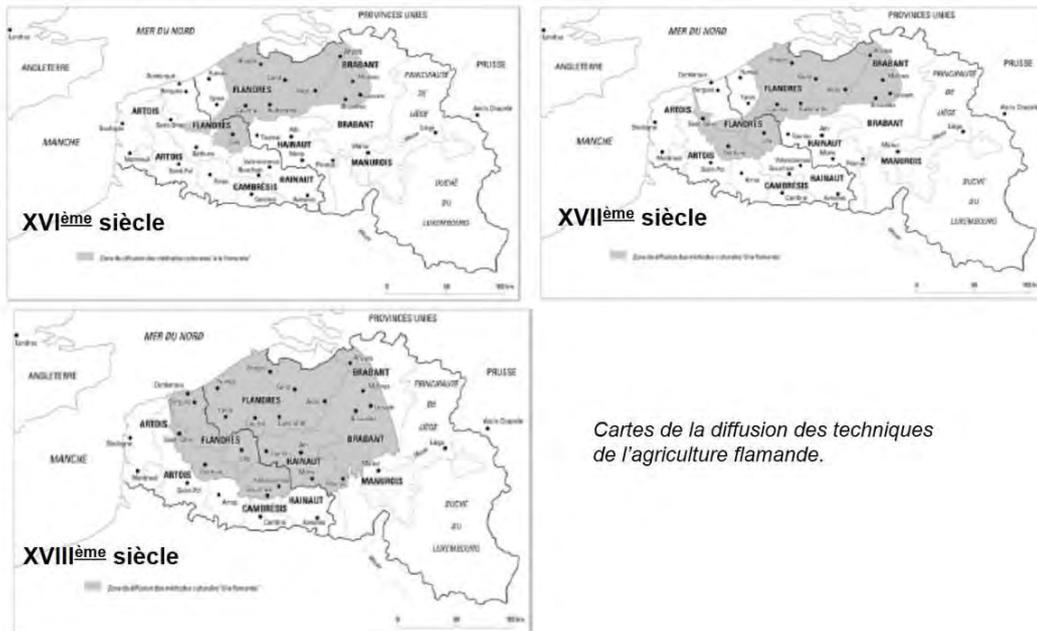
*Défrichage, XIV<sup>ème</sup> siècle*

## défrichage

En Europe du Nord, l'augmentation des rendements de l'agriculture fut notable à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, et passa par plusieurs voies (Delleaux, 2010). Outre l'utilisation systématique de la charrue, les terres furent enrichies massivement avec tous les apports possibles : fumier, cendres, chaux, ainsi que par les selles et boues récoltées des villes. Egalement, la rotation de cultures variées et complémentaires a finalement permit la suppression de la jachère. Ainsi, furent désormais incluses dans la rotation des cultures des plantes fourragères, légumineuses, textiles et oléagineuses qui enrichissaient la terre et permettaient de nourrir le bétail. La rotation des cultures était complexe, adaptée au terroir et pouvait se dérouler sur une période longue. On pouvait trouver par exemple ce type de rotation sur 6 ans : lin / froment, seigle ou escourgeon<sup>112</sup> / colza / froment ou seigle / trèfle / avoine. Ce nouveau système, nommé « **agriculture flamande** », permit là encore de doubler les rendements par rapport au système précédent. Il diffusa progressivement dans de nombreuses régions d'Europe, à l'exception du bassin méditerranéen, jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle. Dans ce dernier, l'utilisation de l'araire et de la jachère était toujours de mise.

---

<sup>112</sup> L'escourgeon est une céréale de la famille de l'orge, principalement utilisée pour l'alimentation, animale ou la bière.



Cartes de la diffusion des techniques de l'agriculture flamande.

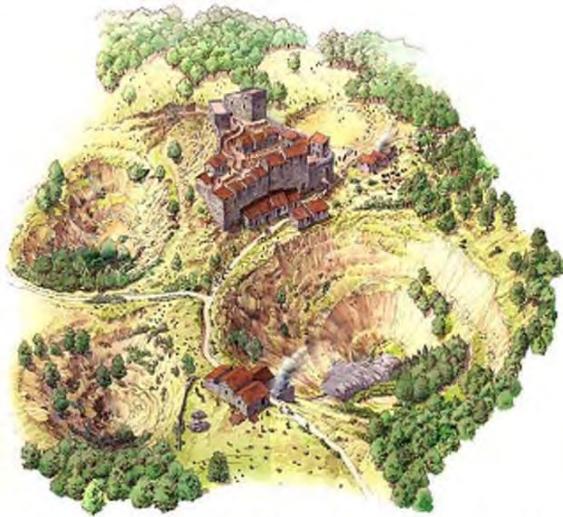
## agriculture flamande

### C. Extraction minière, métallurgie, poterie et verrerie

Au début du Moyen Âge, la grande majorité des mines étaient à **ciel ouvert**. L'extraction souterraine, qui était assez courante sous les Romains, marqua le pas. Lorsque de telles mines existaient, elles étaient composées de puits verticaux prolongés par des **galeries de faible profondeur**, étayées par du bois. La roche était débitée à l'aide d'outils simples (coins, masses, et pics) et pouvait également être fragilisée par le **feu**. L'**aération des mines** était réalisée en agitant des toiles. Le transport du minerai dans les galeries se faisait à dos d'homme, et son extraction à l'aide de cordes en chanvre et de poulies. La présence d'eau dans les galeries était problématique, voire dangereuse, et conduisait souvent à l'abandon des mines. Le creusement de **galeries d'exhaure**<sup>113</sup> était une solution à ce problème et permit dans certains cas le développement d'exploitations à flanc de montagne.

<sup>113</sup> Les galeries d'exhaure, ou araines, permettent à l'eau présente dans les galeries exploitées de s'écouler dans les vallées.

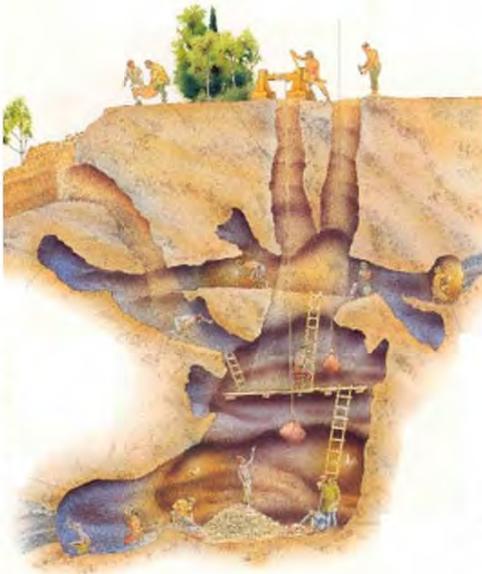
grafica Studio InkLink Firenze



Reconstitution d'un site d'extraction à ciel ouvert, XI<sup>ème</sup>-XII<sup>ème</sup> siècle, Rocchette Pannocchieschi (Italie).

## ciel ouvert

grafica Studio InkLink Firenze



(gauche) Reconstitution d'une mine de cuivre, fer, zinc et plomb argentifère, XI<sup>ème</sup>-XII<sup>ème</sup> siècle, Rocca San Silvestro, Italie. (droite) Dessin d'extraction minière, XVI<sup>ème</sup> siècle.

De Re Metallica, G. Agricola



## galeries de faible profondeur

feu

De Re Metallica, G. Agricola



Feu pour fragiliser la roche

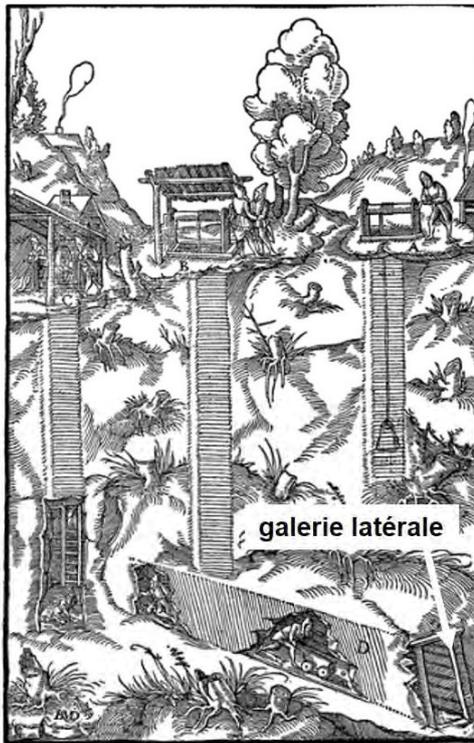
aération des mines

De Re Metallica, G. Agricola



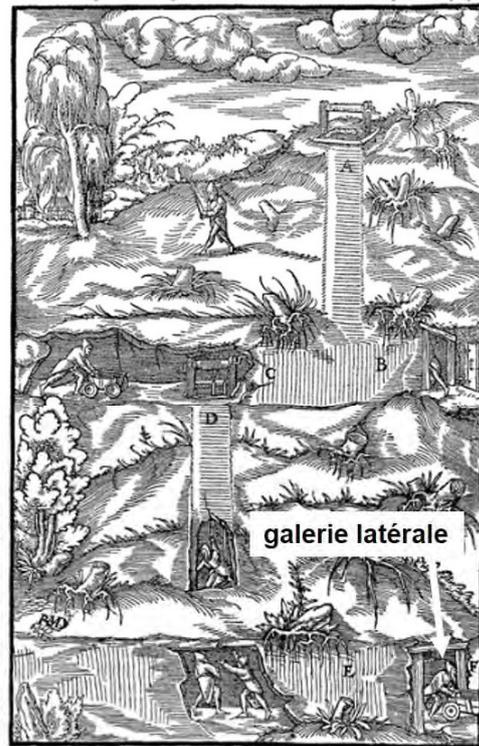
Aération par un tissu

De Re Metallica, G. Agricola



galerie latérale

De Re Metallica, G. Agricola



galerie latérale

Mines avec galerie latérale permettant l'extraction du minerai et l'exhaure.

galeries d'exhaure

C'est avec de telles mines, à flanc de collines, que l'extraction du charbon prit de l'importance dans la région de Liège à partir du début du XII<sup>ème</sup> siècle. Cette nouvelle exploitation se répandit progressivement en Europe, à partir de la fin du XII<sup>ème</sup> siècle. L'usage du charbon était malgré tout peu populaire pour le chauffage en raison de son odeur, et peu répandu pour la métallurgie en raison de l'influence qu'il a sur la qualité du métal. Son importance dans l'apport énergétique au Moyen Âge était donc faible, à l'exception de zones peu riches en bois, notamment la Grande-Bretagne. Une présentation plus détaillée de l'importance du charbon sera présentée dans le Chapitre IV.

A partir du XV<sup>ème</sup> siècle, les mines gagnèrent en importance, en organisation, et en technicité (Agricola, 1556). L'exploitation de surface laissa la place à des réseaux de puits et de galeries renforcées par du bois. Des puits spécifiques étaient creusés pour permettre l'aération des galeries. L'air y était mis en circulation par convection naturelle ou forcée. Dans ce dernier cas, on forçait la circulation de l'air en allumant des feux au pied des puits ou bien à l'aide de **soufflets à main**, à pied, hydrauliques ou actionnés par des manèges. En ce qui concerne l'évacuation de l'eau, lorsque le creusement d'une galerie d'exhaure n'était pas possible, on évacuait l'eau à l'aide de cordes ou de chaînes sans fin munies de **godets**, de **seaux**, ou de tuyaux dans lesquels circulait une **chaîne de boulets**. Au XVI<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de **pompes** aspirantes et foulantes, construites en bois, est rapportée. Ces différents systèmes étaient mus par des manèges, des cages d'écureuil ou des **roues hydrauliques**. Dans les zones où l'eau pouvait être évacuée par le creusement de galeries d'exhaure, ces dernières pouvaient atteindre une longueur impressionnante (jusqu'à 33 km dans une mine en Hongrie), au fur et à mesure que les mines devenaient plus profondes. En ce qui concerne la production de minerai, son évacuation et son broyage, on peut noter plusieurs évolutions importantes. La première est l'utilisation de la poudre à canon pour fragiliser la roche, à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, à la place du feu de bois qui était utilisé jusqu'alors. La seconde est l'apparition dans la première moitié du XVI<sup>ème</sup> siècle de petits **wagons circulant sur des rails en bois** pour le transport du minerai. Au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, on rajouta à ce système des traverses en bois, et on garnit les rails de bandes de fer afin de pallier à leur rapide usure. Les rails permettaient de tripler le poids du chargement pouvant être tracté. Enfin, en ce qui concerne le broyage du minerai, on se mit à utiliser à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle des **bocards**<sup>114</sup> alimentés par des roues hydrauliques, à la place des **meules**.

---

<sup>114</sup> Un bocard est une machine servant à broyer le minerai à l'aide de pilons.

Hungarian National Museum



Mines d'argent, XV<sup>ème</sup> siècle, Kutna Hora (Hongrie)

XV<sup>ème</sup> siècle

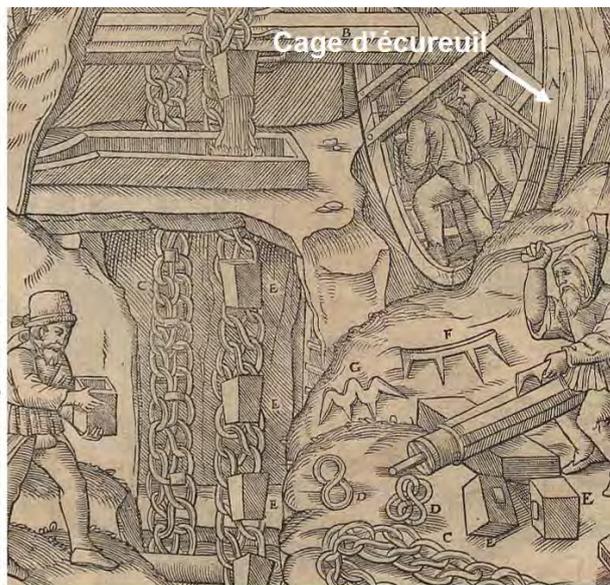
De de metallica. G. Agricola



Soufflet manuel pour ventilation

soufflets à main

De re metallica. G. Agricola, 1550



Chaine de godets à cage d'écureuil, XVI<sup>ème</sup> siècle

godets

De re metallica, G. Agricola, 1550



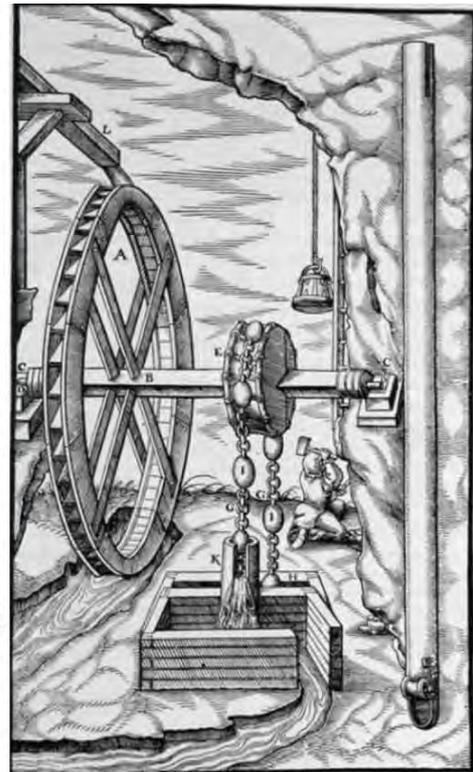
Exhaure à l'aide de seaux, XVI<sup>ème</sup> siècle

## seaux

De re metallica, G. Agricola, 1550

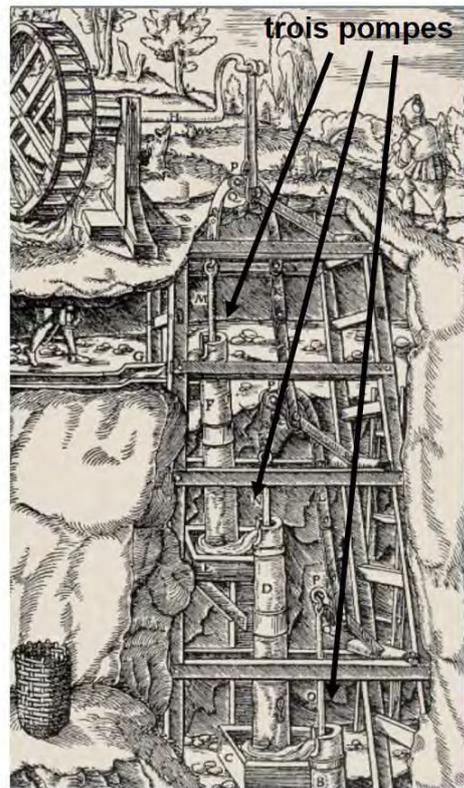


(gauche) Chaine de boulets manuelle, XVI<sup>ème</sup> siècle. (droite) Chaine de boulets hydraulique, XVI<sup>ème</sup> siècle.



## chaine de boulets

De re metallica, G. Agricola, 1550

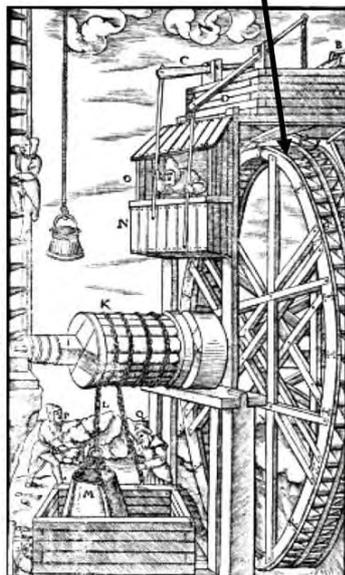


(gauche) Pompe manuelle, XVI<sup>ème</sup> siècle. (droite) Pompes hydrauliques en série, XVI<sup>ème</sup> siècle.

## pompes

Pales avec deux orientations différentes

De re metallica, G. Agricola, 1550



wikipedia commons



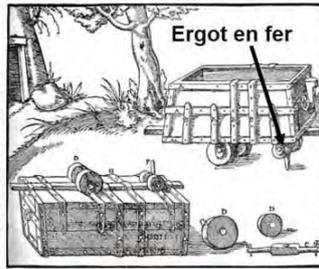
Roue hydraulique réversible (XVI<sup>ème</sup> siècle) et sa reconstitution moderne

## roues hydrauliques

Cosmographie universelle, S. Munster, 1544



De re metallica, G. Agricola  
German museum of technology



pontvalley.net.co.uk



(gauche) Utilisation de wagonnets sur rails en bois, XVI<sup>ème</sup> siècle. (au milieu en haut) Wagonnets: un ergot en fer guidés par deux rails en bois, XVI<sup>ème</sup> siècle. (au milieu en bas) Wagonnet, XVI<sup>ème</sup> siècle. (droite) Wagonnet en bois pour le transport du charbon, Angleterre, XVII<sup>ème</sup> - XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### wagons circulant sur des rails en bois

De Re Metallica, G. Agricola



Encyclopédie d'Alembert



### bocards

Bocard au XVI<sup>ème</sup> (gauche) et XVIII<sup>ème</sup> (droite) siècle.

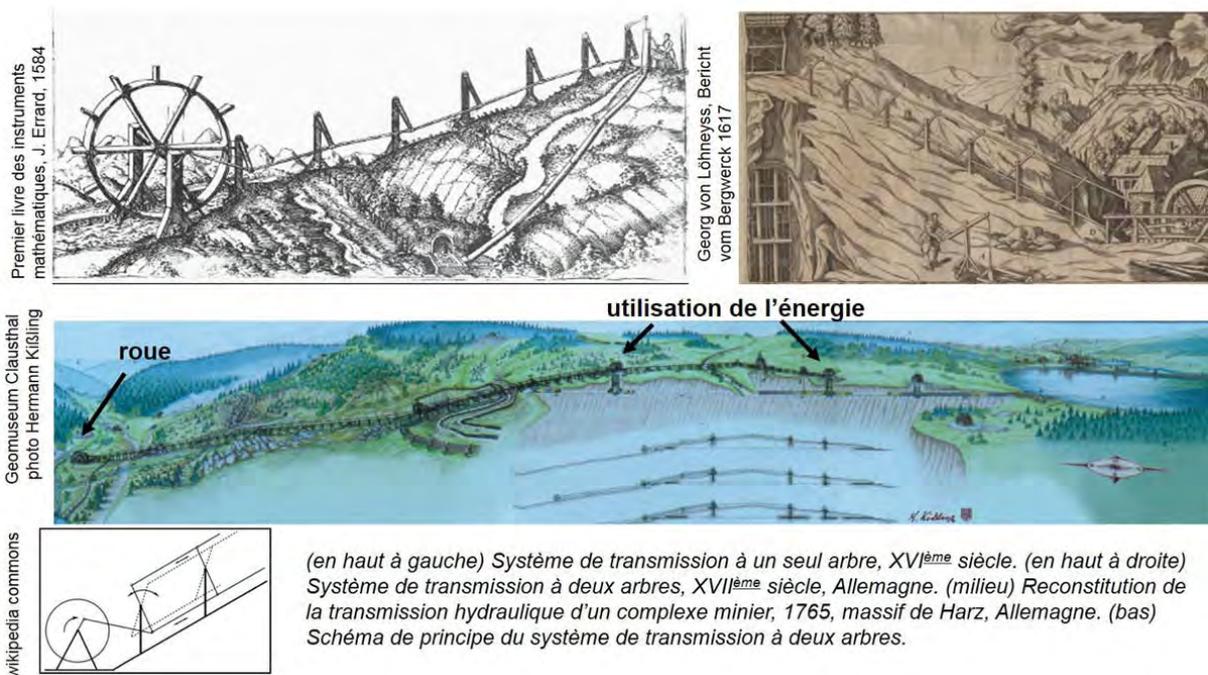
De Re Metallica, G. Agricola



### meules

Meules à cage d'écureuil (ou plutôt de chèvres) et manuelles, XVI<sup>ème</sup> siècle

L'alimentation énergétique de complexes miniers devenus importants et comportant des galeries profondes était un problème crucial. Il paraît clair que l'énergie hydraulique, à la fois puissante et gratuite une fois installée, était préférable à l'utilisation de force humaine ou animale. Ceci est dans beaucoup de cas difficilement compatible avec la localisation des mines, généralement situées en montagne. Dans certains complexes miniers, des torrents ou cours d'eau furent détournés pour alimenter les mines en énergie hydraulique. Une autre possibilité, qui a été mise en place à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, consiste à transmettre à distance l'énergie produite par une roue hydraulique – située dans une vallée, par exemple – en utilisant des **arbres de transmission en bois** (De Decker, 2013). Cette méthode permettait ainsi une transmission de l'énergie hydraulique sur 2 kms au XVII<sup>ème</sup> siècle et 4 kms au XVIII<sup>ème</sup> siècle, une seule roue pouvant également alimenter plusieurs lieux.



## arbres de transmission en bois

Une fois extrait, le minerai doit être réduit pour être transformé en métal. Vers le VIII<sup>ème</sup> siècle, la réduction du minerai de fer se faisait dans des **bas-fourneaux**, composés de terre et de pierre, qui mesuraient une cinquantaine de centimètres de haut. Ils furent dotés ensuite d'une cheminée, qui s'agrandit progressivement, jusqu'à atteindre 2 mètres de haut au XII<sup>ème</sup> siècle. A cette époque, les fours étaient construits en maçonnerie. Les **soufflets hydrauliques**<sup>115</sup>, qui étaient déjà été utilisés dans la Chine dès le I<sup>er</sup> siècle, apparurent en Occident au XIII<sup>ème</sup> siècle, entraînant une délocalisation progressive des sites de métallurgie à proximité des cours d'eau, alors qu'ils étaient jusqu'alors localisés à proximité des zones d'extraction de minerais (Sprandel, 1969). L'augmentation de la taille des fours, de la quantité de combustible, et de la

<sup>115</sup> Les soufflets hydrauliques sont des soufflets de grande taille actionnés par une roue à eau.

température fit que ces bas-fourneaux évoluèrent progressivement vers des **haut-fourneaux** produisant de la fonte. Les premières traces de production de fonte datent du début du XIII<sup>ème</sup> siècle, en Allemagne, dans des fours qui faisaient environ 3 mètres de haut (Ledebur, 1895). Au XVI<sup>ème</sup> siècle, certains hauts-fourneaux pouvaient atteindre 5 à 6 mètres de haut. Dans les haut-fourneaux, la **fonte** s'écoulait du bas du four et était moulée en blocs de différentes formes en vue d'un usage ultérieur. Elle était également coulée directement dans des moules pour fabriquer certains objets, notamment les ustensiles de cheminée ou de cuisine. Pour l'obtention du fer, la décarburation de la fonte s'effectuait dans des **affineries**, en utilisant la méthode dite « wallonne ». Dans cette dernière, la fonte est chauffée dans un foyer sous une atmosphère oxydante créée par des soufflets. Le carbone de la fonte s'oxyde en CO<sub>2</sub> et quitte le métal, permettant d'obtenir du fer ou de l'acier. Le métal obtenu par cette méthode contient néanmoins encore des scories et doit être **cinglé**<sup>41</sup> pour les évacuer, et pour former des barres métalliques utilisables par les forgerons. Cette dernière opération pouvait s'effectuer au marteau ou en utilisant un martinet hydraulique<sup>103</sup>. Enfin, apparurent au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle en Angleterre les premiers **fours à réverbère**<sup>116</sup>. Dans ces fours, l'absence de contact direct entre métal et combustible évitait la contamination du métal, et permit notamment aux Anglais d'utiliser leur abondant charbon comme combustible (voir le Chapitre III) pour l'affinage de la fonte; ils permettaient également de refondre la fonte et d'autres métaux afin de les recycler, en particulier les canons et leurs boulets; enfin, ils étaient bien adaptés au grillage des minerais. Leur usage se répandit dans toute l'Europe à partir de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

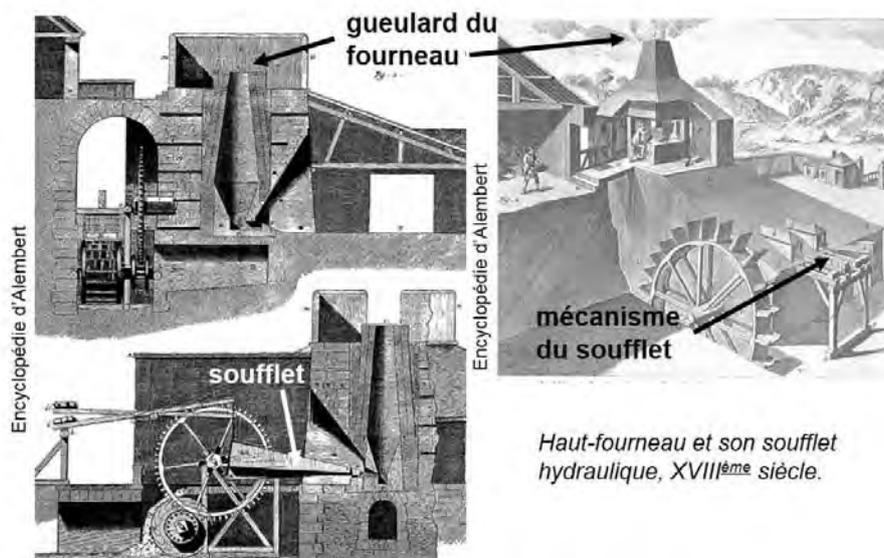


Bas-fourneau

## bas-fourneaux

---

<sup>116</sup> Les fours à réverbères contiennent deux chambres côte à côte mais séparées : une pour le combustible et une pour le métal à fondre. La chaleur du foyer est réémise par le plafond du four. Le métal n'est pas en contact direct avec le combustible, mais reste néanmoins sur le trajet des gaz chauds du foyer, et est donc chauffé à la fois par ces derniers et par rayonnement.



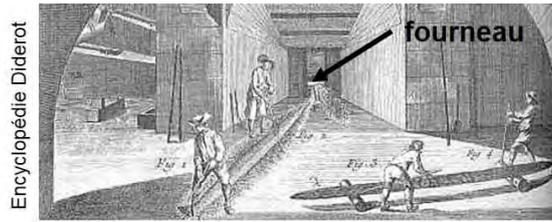
Haut-fourneau et son soufflet hydraulique, XVII<sup>ème</sup> siècle.

## soufflets hydrauliques



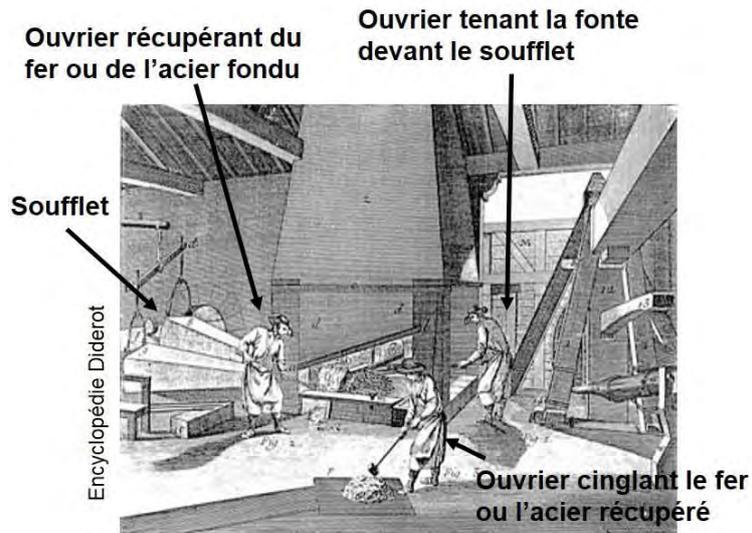
(en haut à gauche) Haut-fourneau dans un détail de tableau, XVI<sup>ème</sup> siècle, Belgique. (en haut à droite) Haut-fourneau, 1610, Belgique. (bas) Quatre hauts-fourneaux dans un détail de tableau, XVI<sup>ème</sup> siècle, Belgique.

## haut-fourneaux



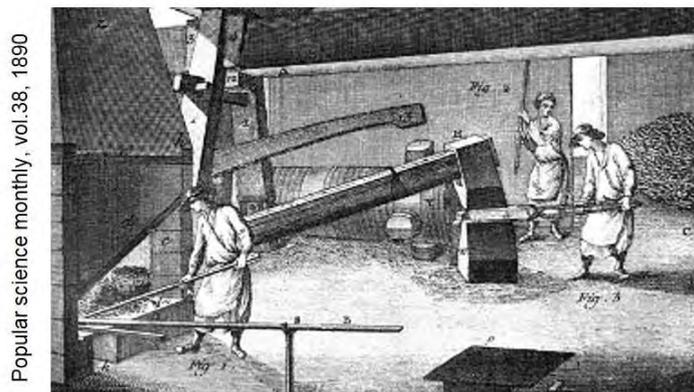
Encyclopédie Diderot  
Préparation à la coulée de fonte du haut-fourneau

fonte



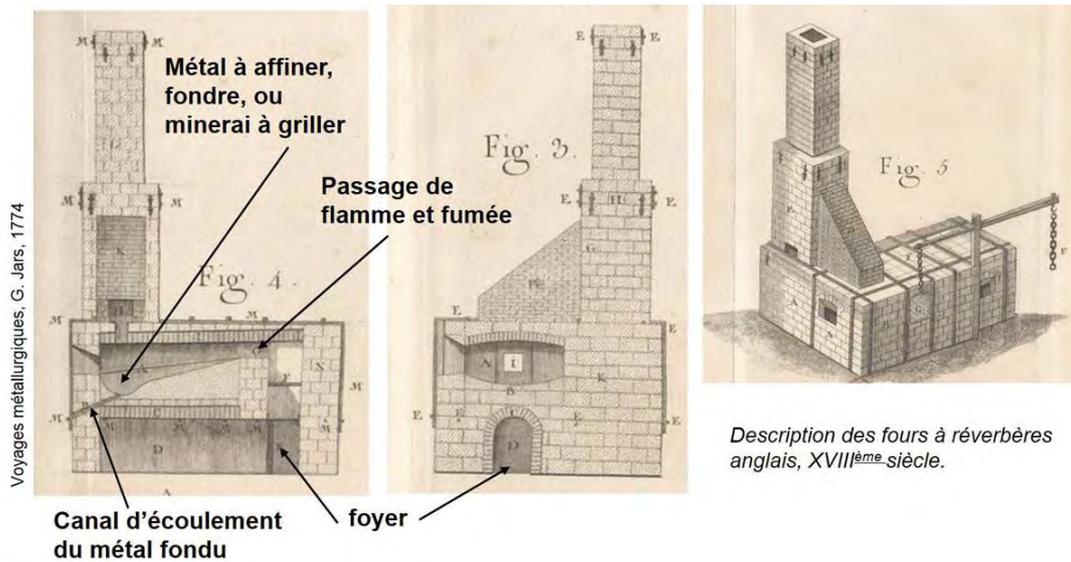
Encyclopédie Diderot  
Méthode wallonne dans une affinerie, XVIII<sup>ème</sup> siècle

affineries



Popular science monthly, vol.38, 1890  
Cinglage au martinet dans une affinerie anglaise

cinglé



## fours à réverbère

Les autres métaux les plus courants (cuivre, plomb, étain) s'obtenaient comme dans l'antiquité en **grillant** le minerai, ce qui lui ôtait son soufre et son arsenic, et oxydait le métal. La deuxième étape de réduction était semblable à celle du fer, mis à part que la température à atteindre dépendait fortement des métaux, et nécessitait donc des **fours** plus ou moins élaborés. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le Chapitre I, obtenir du zinc métallique nécessitait une technique de fabrication spéciale qui avait été développée en Inde, et resta inconnue en Europe jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Avant cette date, pour enrichir en zinc le cuivre, on suivait donc toujours la méthode de cémentation utilisée dans l'Antiquité, basée sur l'utilisation de carbonate de zinc (Lantier, 1957 ; Bourgarit, 2012).



## grillant

Grillage de galène en vue de l'obtention d'oxyde de plomb, XV<sup>ème</sup> siècle.

## fours

grafica Studio InkLink Firenze



*Coulée de plomb argentifère, XI<sup>ème</sup>-XII<sup>ème</sup> siècle (Italie).*

Au début du Moyen Âge, le cuivre et ses alliages restaient des métaux onéreux, utilisés essentiellement en fines feuilles pour du placage de fer ou de bois. A partir du XIII<sup>ème</sup> siècle, le nombre d'objets d'usage courant en **alliages de cuivre** augmenta notablement, en particulier les ustensiles de cuisine et de vaisselle. Suivant la nature de l'objet, le degré de brillance recherché, les métaux disponibles, on utilisait des métaux contenant des quantités variables de cuivre, étain, plomb ou zinc, donnant lieu à différents alliages : bronze pur, bronze au plomb, alliage cuivre-plomb, étain pur, laiton au plomb, etc. L'alliage cuivre-plomb était réservé aux objets les plus grossiers (chaudron par exemple), et le laiton pur pour les objets de luxe destinés à l'Eglise ou l'aristocratie. L'étain était également utilisé pour la fabrication du **fer blanc**, ou fer étamé. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, sa fabrication se développa en Europe, après avoir été un monopole de la Bohème depuis le XIII<sup>ème</sup> siècle. Il permettait d'éviter la corrosion du fer, et était fabriqué en trempant des tôles de fer dans de l'étain fondu.

D. Bagaut, CZRMF et Service public de Wallonie - D. Pat



*Chaudron en bronze au plomb, Belgique (XIV<sup>ème</sup>-XV<sup>ème</sup> siècle)*

Guy Focant, Service public de Wallonie - D. Pat



*Chandelier en laiton, Belgique (XV<sup>ème</sup> siècle)*

Guy Focant, Service public de Wallonie - D. Pat



*Vase en laiton au plomb, Belgique (XV<sup>ème</sup> siècle)*

Fouilles du parc St Georges, Inrap



*Vaisselle en étain, Lyon (XIV<sup>ème</sup>-XV<sup>ème</sup> siècle)*

J.-Y. Laccôte/Archéa, JPGF Liviers-le-bel



*Boucle de ceinture en bronze, France (XIII<sup>ème</sup> siècle).*

J.-Y. Laccôte/Archéa, F. Gentili, Inrap



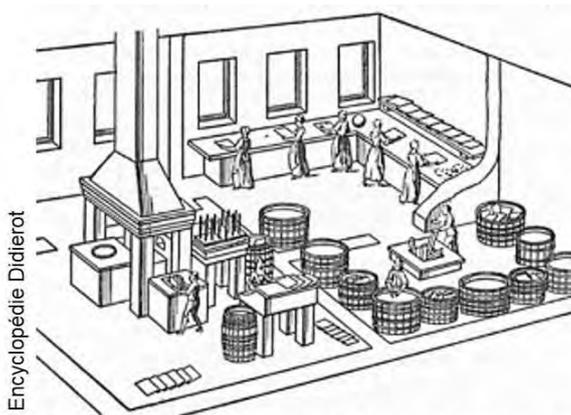
*Epingles en bronze, France (XIV<sup>ème</sup>-XV<sup>ème</sup> siècle).*

Guy Focant, Service public de Wallonie - D. Pat



*Plat en laiton au bronze, Belgique (XV<sup>ème</sup> siècle)*

## alliages de cuivre



Encyclopédie Didierot

## fer blanc

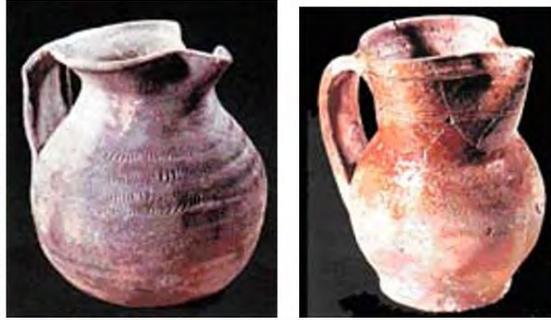
*Atelier de fabrication de fer blanc (trempage du fer dans de l'étain fondu), XVII<sup>ème</sup> siècle.*

Plusieurs nouveaux métaux furent identifiés après le XVI<sup>ème</sup> siècle. C'est ainsi que le bismuth, longtemps confondu avec le plomb et l'étain, fut considéré comme un élément distinct au XVI<sup>ème</sup> siècle. De même, deux éléments furent obtenus sous leur forme métallique et clairement identifiés à cette époque, bien que leurs oxydes et sulfures aient été utilisés pour différents usages depuis longtemps: l'arsenic et l'antimoine. La fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle vit une avalanche de découverte de nouveaux éléments, grâce à la recherche systématique de métaux dans des minerais rares ou des minerais dont on n'avait jusqu'alors pas encore réussi à extraire de métaux. C'est ainsi que furent mis en évidence cobalt (1735), platine (1750), nickel (1751), manganèse (1780), tungstène (1783), uranium et zirconium (1789), titane (1791), chrome (1797), tellure (1798), cérium (1803), iridium, osmium, palladium et rhodium (1804) (Baudet, 2004).

En ce qui concerne la céramique, l'entrée dans le Moyen Âge fut caractérisée par la disparition de la technique antique de la glaçure et des formes élaborées de poterie. La plupart des **poteries** étaient alors grises, car cuites dans des fours fermés en atmosphère réductrice, et n'étaient pas parfaitement imperméables. L'introduction de la technique de la **glaçure** à l'oxyde de plomb et celle de la **faïence**<sup>117</sup> se firent progressivement entre le X<sup>ème</sup> et le XIV<sup>ème</sup> siècle, par diffusion depuis les empires byzantins et islamiques, où l'art de la céramique était très développé.

<sup>117</sup> La faïence est une couche composée d'un mélange d'oxyde d'étain et d'oxyde de plomb cuite à haute température. Alors que la glaçure à l'oxyde de plomb forme une couche brillante et transparente, la faïence est opaque et blanche, et ce d'autant plus que la proportion d'oxyde d'étain est importante.

edition.lamuse.free.fr



## **poteries**

*(gauche) Pot à pâte grise, XII<sup>ème</sup> siècle, Provence. (droite) Pot à pâte rouge glaçuré, XIV<sup>ème</sup> siècle, Provence.*

J.-L. Tupin, Ville de Besançon



## **glaçure**

*Récipients en céramique à glaçure verte et décor d'engobes, destinées à la cuisson, à la table, au stockage et à la préparation, Besançon, XVII<sup>ème</sup>-XVIII<sup>ème</sup> siècle.*

Musée de la faïence, Marseille



## **faïence**

*Pot de pharmacie en faïence, Rouen, fin XVII<sup>ème</sup> siècle.*

Les techniques de verrerie, elles aussi, connurent un redémarrage laborieux au début du Moyen Âge, les verriers occidentaux se contentant de recycler le verre issu de l'époque romaine. A partir de la fin du VIII<sup>ème</sup> siècle, les verriers se mirent à fabriquer le verre à partir de sable de rivière, en utilisant comme fondant de la cendre issue de plantes forestières, contenant principalement de la potasse (Hartwig, 2017). Ce verre, souvent appelé par son nom allemand *waldglass* (verre de forêt) était vert et peu transparent. De par la forte consommation de bois requise pour la fabrication, ces **ateliers** étaient situés au milieu de forêts. A partir du XIII<sup>ème</sup> siècle, le « **verre de Venise** », de grande qualité, fut développé dans cette ville en utilisant des cendres de plantes halophytes importées du Moyen-Orient, et lavées afin d'augmenter leur teneur en soude ; il s'agissait donc d'un verre dit « sodique ». De la magnésie était rajoutée comme stabilisant. Le seul inconvénient du procédé de lavage des cendres est qu'il en ôtait le calcium (CaO), diminuant la stabilité dans le temps du verre. Ailleurs en Europe, les cendres végétales brutes continuaient à être utilisées. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, des cendres forestières de grande qualité furent développées en **Bohème**, donnant lieu à un verre du même nom, de meilleure qualité que le verre de Venise, et de meilleure stabilité dans le temps (verre calco-potassique). A cette même époque, les techniques de verrerie, et en particulier celles du lavage des cendres, diffusèrent en Europe, et furent adoptées par tous les verriers, qui les appliquèrent aux cendres forestières ou à celles issues de plantes halophytes européennes.



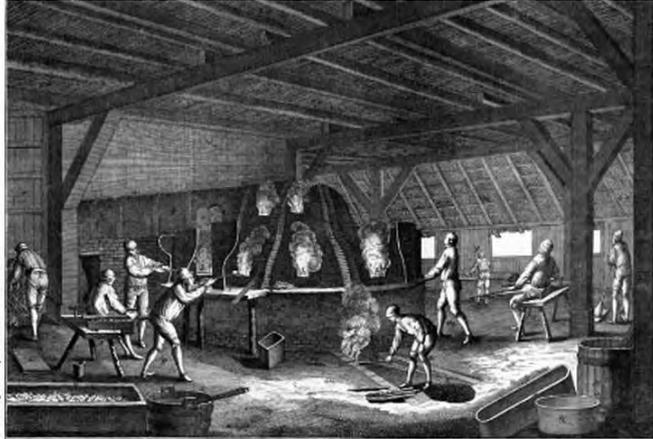
**waldglass**

*Waldglass, Allemagne,  
XV<sup>ème</sup> siècle*

The Travels of Sir John Mandeville.



Encyclopédie Diderot



(gauche) Atelier, Bohème, XV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Petit atelier de verrerie, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### ateliers

British museum, wikicommons



Corning museum of glass



(gauche) Verre de Venise, 1330.  
(droite) Verre à vin, Venise, 1600

### verre de Venise

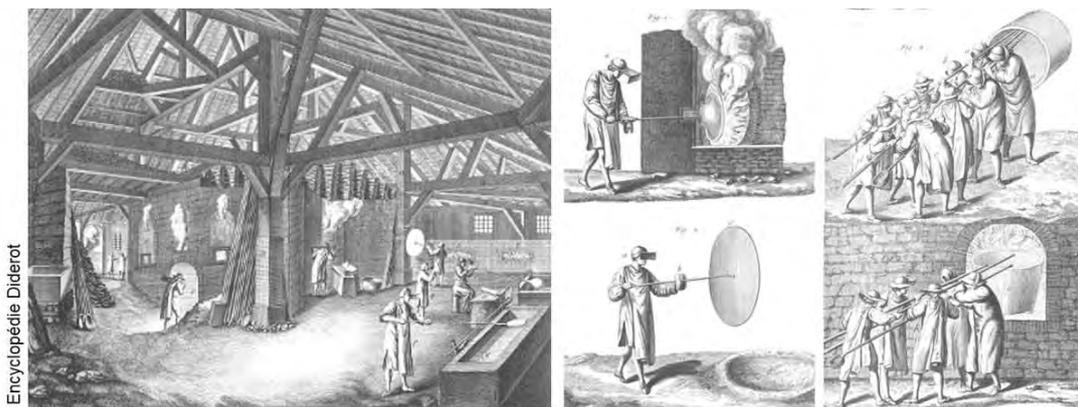
Museum of Glass in Nový Bor, M. Gelnar



Verre de Bohème, 1700

### Bohème

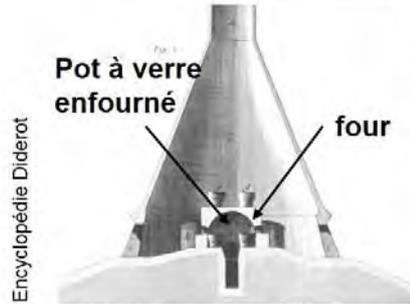
C'est au XII<sup>ème</sup> siècle qu'est faite mention du premier miroir en verre. Leur tain<sup>118</sup> fut de plomb jusqu'au XV<sup>ème</sup> siècle, et en étain par la suite. Au XIV<sup>ème</sup> siècle, une technique différente de celle développée par les Romains pour fabriquer le **verre à vitre** apparut. Elle consistait à mettre en rotation rapide une boule de verre en fusion au bout d'une perche, ce qui formait ensuite un disque de verre plus épais au centre qu'au bord. Cette nouvelle technique permit de développer l'usage de vitres chez les particuliers, alors qu'elles étaient jusqu'alors réservées à des usages ou des bâtiments exceptionnels. Les premiers **verres coulés** datent de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, et permirent de produire du verre plat de surface plus grande qu'avec les deux techniques employées jusqu'alors. Cela nécessitait le déplacement et le basculement sur une surface plane métallique de centaines de litres de verre en fusion. Cette production avait lieu dans des **manufactures** dans lesquelles travaillaient plusieurs dizaines d'ouvriers. Une des étapes particulièrement longue du procédé était le **polissage** des vitres, qui pouvait prendre plusieurs semaines. Il existait néanmoins au XVIII<sup>ème</sup> siècle des **machines hydrauliques** permettant d'effectuer cette tâche. On peut noter que la très forte consommation de bois liée à la production du verre conduisit, au XVII<sup>ème</sup> siècle, dans les régions où cela était possible, à l'utilisation du charbon dans les fours, mais le bois resta majoritairement utilisé jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Enfin, en ce qui concerne la technique assez spécifique de la taille du verre, on notera qu'elle s'effectuait traditionnellement en affaiblissant la zone de découpe prévue avec du fer chaud, et en appliquant ensuite une force de telle sorte que la fissure se forme suivant la zone affaiblie. C'est à partir du XV<sup>ème</sup> siècle que l'on se mit à utiliser le diamant pour tailler le fer (Lecoq, 2005).



(gauche) Verrerie à vitre, XVII<sup>ème</sup> siècle. (milieu) Méthode pour former une vitre par rotation. (droite) Transport puis enfournage d'un pot réfractaire destiné à contenir le verre en fusion.

## verre à vitre

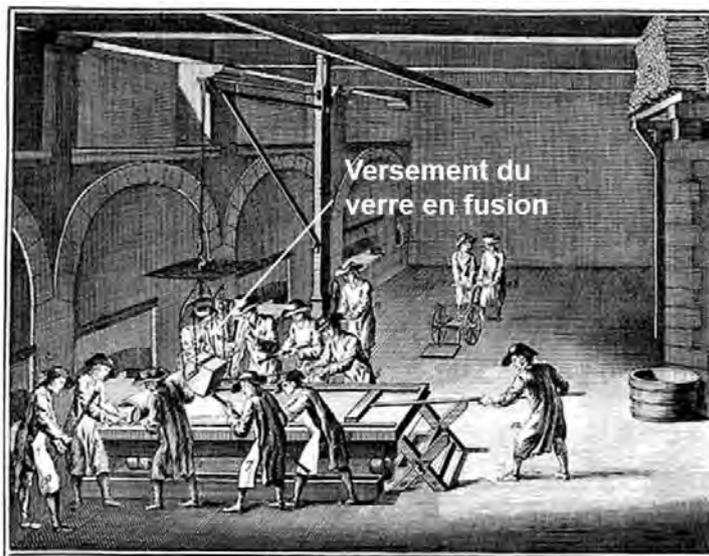
<sup>118</sup> Le tain est la feuille métallique recouvrant l'arrière du miroir et responsable de la réflexion de la lumière, le verre ne servant en fait qu'à protéger le métal de l'oxydation.



Encyclopédie Diderot

Verrerie anglaise, XVIII<sup>ème</sup> siècle

**verres coulés**



Encyclopédie Diderot

Manufacture des glaces, Saint Gobain, XVIII<sup>ème</sup> siècle

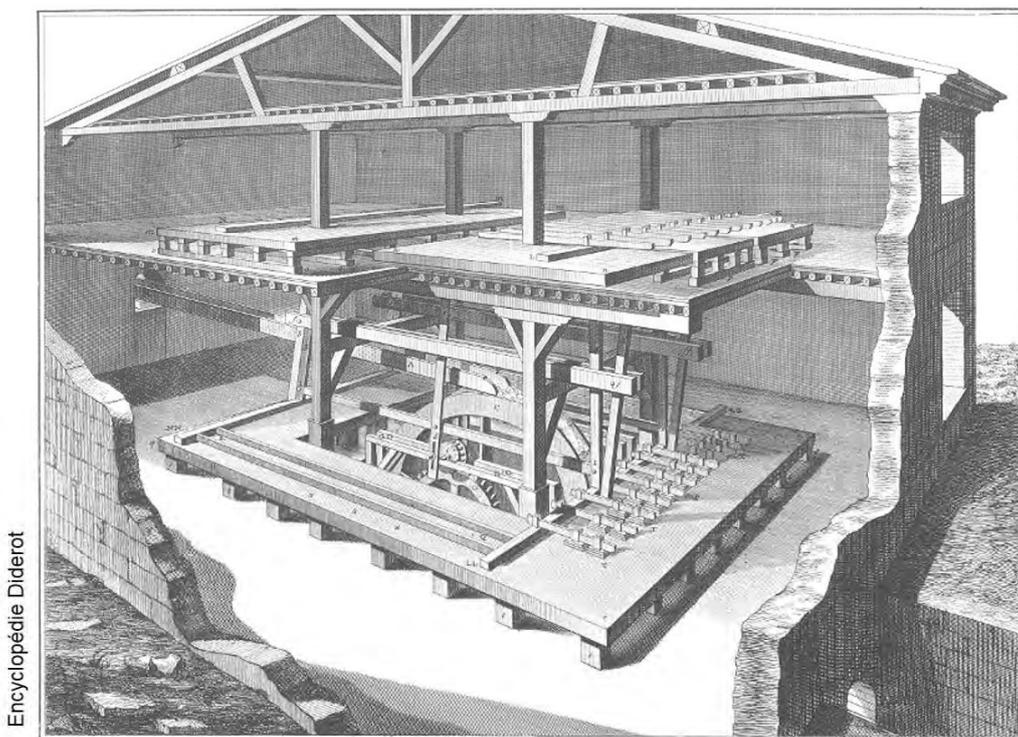
**manufactures**



Encyclopédie Diderot

Polissage

**polissage**



Machine à polir les glaces, établie à Saint Yldefonse, près de Madrid, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

## **machines hydrauliques**

### **D. La chimie**

Ce n'est qu'au XII<sup>ème</sup> siècle que la chimie arabe arriva en Occident, après la traduction de manuscrits. On redécouvrit donc progressivement à partir de cette époque techniques et procédés chimiques. A partir du XV<sup>ème</sup> siècle, on assista à une augmentation de la production de produits chimiques, liée à l'essor des besoins pour la teinturerie. La plupart des procédés chimiques et produits utilisés n'évoluèrent pas jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, mais les instruments (fours, alambics, ...) se perfectionnèrent et grossirent, permettant la production de quantités importantes de produits. L'art du chimiste étant d'obtenir des produits finaux très différents à partir d'un mélange de quelques produits initiaux, il nous est apparu plus simple pour cette partie de commencer par présenter quelques produits élémentaires.

De nombreuses réactions chimiques nécessitent une source basique. Comme dans l'Antiquité, la soude et la potasse, les deux principales bases utilisées en chimie, étaient fabriquées par combustions de plantes. Ce faisant, on obtient généralement un mélange de différents sels plutôt riches en soude ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou en potasse ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), et dont les cendres sont adaptées à certaines applications. A cette époque, pour produire la potasse, on utilisait les cendres de bois ou de la lie de vin et, pour obtenir de la soude, on utilisait comme dans l'antiquité des plantes halophytes telles que la *salsola kali*, la *salicornia fruticosa* (de la famille de la salicorne, cultivée en France), de la *salsoda soda*

ou du **varech** <sup>119</sup> (Rasmussen, 2008). Les plantes halophytes cultivées en Espagne, où elles étaient appelées « barille », donnaient une soude de qualité, dite « soude d'Alicante », et furent l'objet d'un commerce important jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle. Dans tous les cas, pour obtenir de la potasse ou de la soude la plus pure possible et déshydratée, la partie des cendres qui était soluble dans l'eau était récupérée, évaporée et éventuellement calcinée pour la déshydrater. Le chlorure d'ammonium (NH<sub>4</sub>Cl), appelé à l'époque « **sel ammoniac** », est également basique, et était importé d'Égypte. Il y était fabriqué par la combustion de fientes d'animaux ou de selles humaines. Alternativement, c'est une roche que l'on peut trouver à proximité de volcans, et que l'on peut purifier par lixiviation dans l'eau<sup>56</sup> et évaporation (Diderot, 1751). Les procédés d'obtention de **chaux** et de vitriol, eux, n'avaient pas varié depuis l'Antiquité : calcination de calcaire pour la chaux, et lixiviation de roches contenant des sulfates métalliques pour le vitriol.



Etienne Aspore

*Salsola kali*

### **salsola kali**



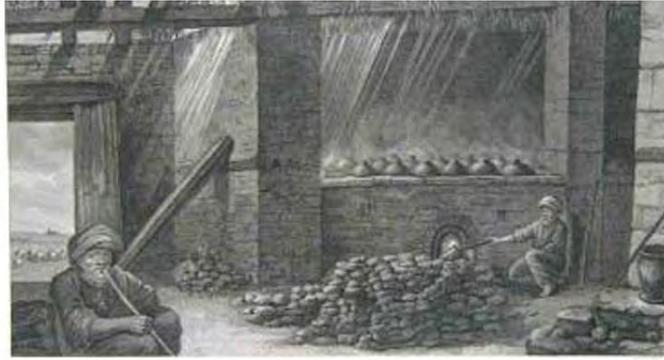
Bernard Paillard, Plozarch,  
plozevet.hypotheses.org/4312

*Pains de soude de varech, Bretagne.*

### **varech**

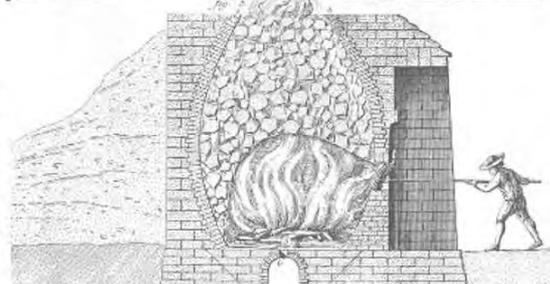
---

<sup>119</sup> Le varech est une algue.



*Le fabricant de sel ammoniac, Egypte, 1800*

## **sel ammoniac**



*Four à chaux, XVIII<sup>ème</sup> siècle*

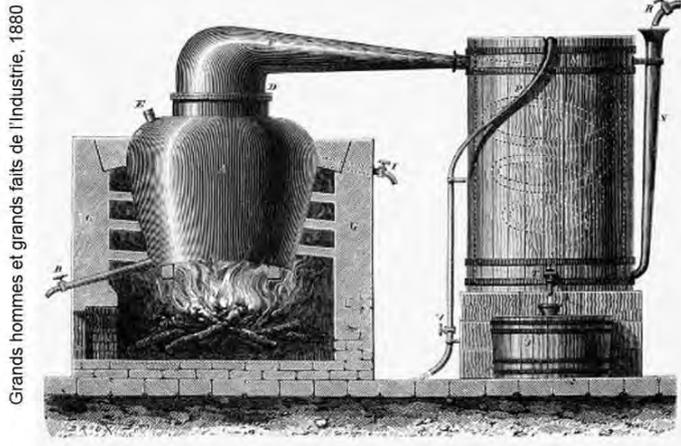
## **chaux**

L'alcool est un élément de base très utilisé en chimie moderne, mais il l'était relativement peu au Moyen Âge, à l'exception de la fabrication d'extraits de plantes à visée thérapeutique. On peut noter que les **alambics** munis de système de condensation à circulation d'eau apparurent vers le XII<sup>ème</sup> siècle, permettant de raccourcir considérablement le temps de fabrication de l'alcool.



Hieronymus Brunschwig

(gauche) Appareil à distiller, 1500.  
(droite) Alambic à circulation d'eau, développé par Jean-Antoine Chaptal (cf chaptalisation) en 1780.

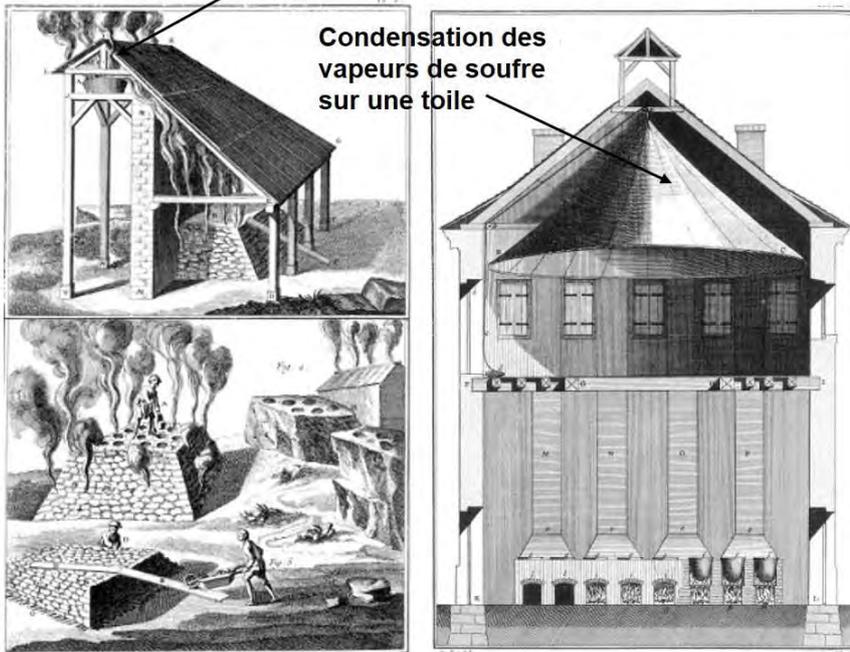


Grands hommes et grands faits de l'Industrie, 1880

### alambics

Un matériau important était le **soufre**, qui fut pendant longtemps extrait de roches à l'état natif. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, dans des régions éloignées de mines de soufre, on commença à l'obtenir à partir de pyrite de fer. Le procédé, avec très faible rendement, consistait à griller la pyrite, et à récupérer le soufre liquide ou à condenser les vapeurs de soufre émises lors du grillage, en utilisant de grandes toiles en tissus, par exemple. Comme on le verra plus loin, ce soufre servait à la fabrication de l'acide sulfurique et de la poudre à canon.

#### Condensation des vapeurs de soufre dans des baquets d'eau



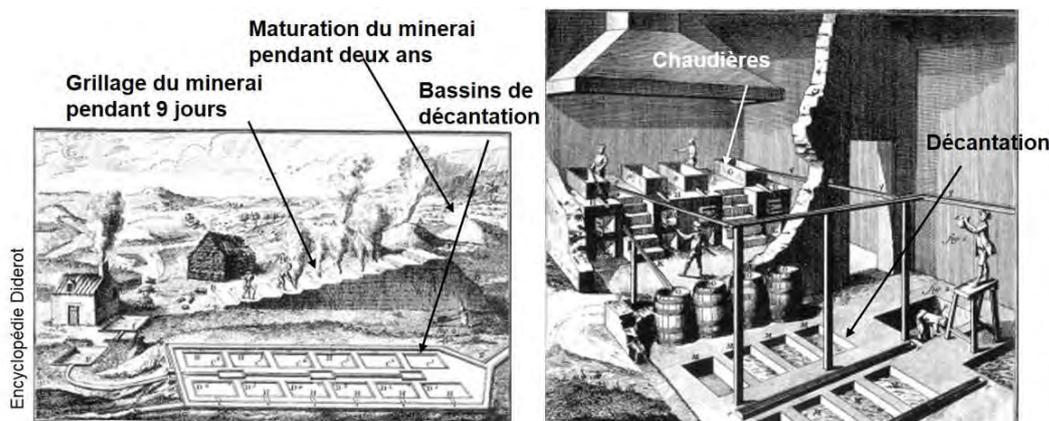
Condensation des vapeurs de soufre sur une toile

Encyclopédie Diderot

Fabrication de soufre à partir de pyrite, Allemagne, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### soufre

L'**alun**<sup>54</sup> est un autre matériau élémentaire, qui n'était pas trouvé à l'état naturel en Occident, mais importé d'Égypte, puis d'Asie Mineure à partir du XIII<sup>ème</sup> siècle (Jacoby, 2005). L'approvisionnement de cette source connut des difficultés à partir du XV<sup>ème</sup> siècle, à la suite de bouleversements politiques, dont la conquête de l'Asie Mineure par les Ottomans. De l'alunite, mélange d'alun et d'alumine, fut alors exploitée en Italie. Dans diverses régions (Angleterre, France, Belgique, Suède), on trouvait également des roches contenant de l'alun, dont il pouvait être extrait moyennant plusieurs étapes de maturation, grillage, lessivage, chauffage, décantation, etc (Girardin, 1837). L'alun était utilisé en médecine, hygiène, cosmétique, teinturerie, papeterie et pour dessaler les morues (Diderot, 1751).

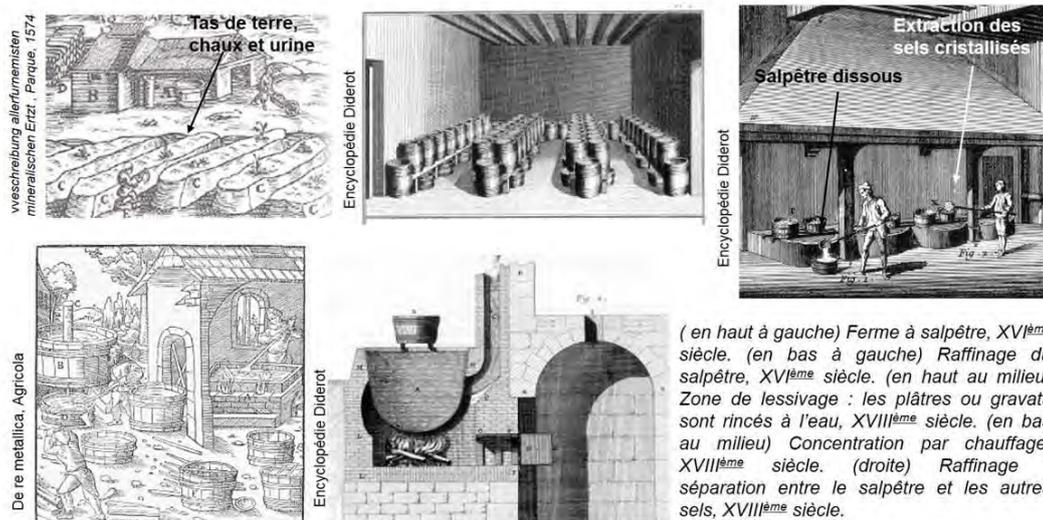


Etapes de l'obtention de l'alun, Belgique, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

## alun

Un autre matériau élémentaire est le **salpêtre**, qui était au début importé d'Inde, d'où il était détaché de parois par broissage. Il fut ensuite récupéré localement sur les murs de lieux humides (caves), ou dans des lieux où de la pierre était en contact avec de l'urine (bergeries, écuries). A partir du XV<sup>ème</sup> siècle, face à la hausse de la demande pour la fabrication de la poudre à canon, des salpêtrières furent fabriquées. Elles consistaient à faire réagir de la terre avec de l'urine et de la chaux, pendant plusieurs semaines, puis à passer de l'eau chaude à travers cette terre, et à la purifier (Partington, 1960). Quelle que soit la méthode d'obtention du salpêtre brut (broissage des murs ou salpêtrière), il devait être purifié plusieurs fois pour en ôter les matières organiques et les autres sels. On utilisait pour cela le collage<sup>120</sup> pour ôter les matières organiques. Ensuite, on opérait des phases de chauffage et de cristallisation, qui permettait de récupérer du salpêtre en se basant sur sa différence de solubilité avec les autres sels. On pouvait également utiliser des réactions chimiques entre ces sels et la potasse ou l'alun. En dehors des autres utilisations que nous verrons plus loin, le salpêtre était utilisé pour purifier l'argent (Diderot, 1751).

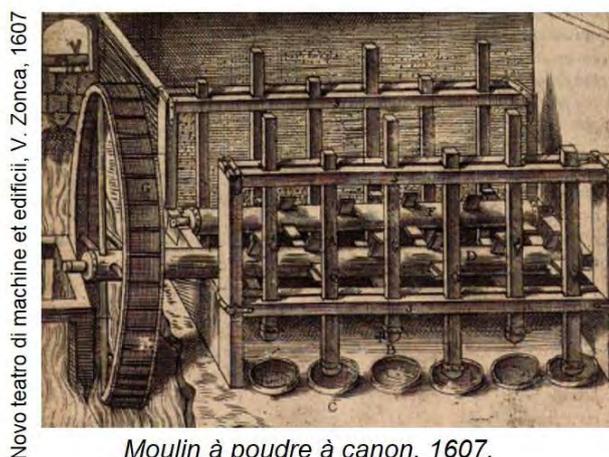
<sup>120</sup> Le collage, utilisé par exemple dans la préparation du vin, consiste à introduire une colle (blanc d'œuf, gélatine, ...) dans une solution de manière à faire précipiter les matières organiques.



## salpêtre

A partir de ces différents produits élémentaires, plusieurs produits finaux étaient fabriqués. Ainsi, le savon du Moyen Âge était obtenu par réaction entre de la cendre de bois et un corps gras, donnant un savon plutôt pâteux. A partir du XII<sup>ème</sup> siècle, en utilisant de la chaux ou de la soude végétale, on obtenait un savon dur, utilisé pour l'hygiène. Les savons liquides, obtenus en utilisant de la potasse, étaient utilisés pour le feutrage<sup>121</sup> de la laine.

Les **explosifs** du XIV<sup>ème</sup> siècle étaient composés d'un mélange de salpêtre, soufre et de charbon de bois, dont les proportions ont évoluées dans le temps, et étaient également différentes suivants les usages (mines, canon, ...). La fabrication de la poudre nécessitait l'usage de pilons et mortiers, qui étaient jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle manuels, et furent par la suite entraînés par des **roues hydrauliques**.

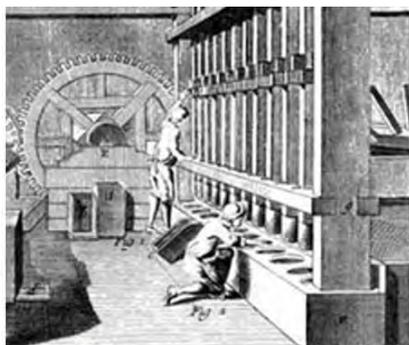


Novo teatro di machine et edifici, V. Zonca, 1607

Moulin à poudre à canon, 1607.

## explosifs

<sup>121</sup> Transformer la laine en feutre nécessite d'entremêler les fibres de laine, en les frottant. Le savonnage de la laine permet aux fibres de glisser les unes sur les autres et de s'entremêler.

Moulin à poudre à canon, XVII<sup>ème</sup> siècle

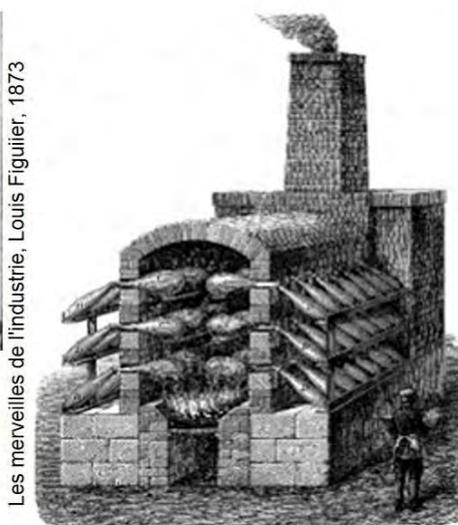
## roues hydrauliques

L'**acide sulfurique** ( $H_2SO_4$ ) fut fabriqué en Occident à partir du XII<sup>ème</sup> ou XIII<sup>ème</sup> siècle, suivant la méthode utilisée dans l'Empire islamique, c'est-à-dire par distillation de sulfate de cuivre ou de fer (vitriol) (Baudet, 2004 ; Myers, 2007). Une méthode alternative fut mise au point au XVII<sup>ème</sup> siècle, et consistait à brûler du soufre avec du salpêtre sous une cloche, conduisant à de l'acide sulfurique très concentré (Kutney, 2007). La production à grande échelle de cet acide était limitée par la taille des récipients en verre permettant d'effectuer la réaction. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de chambres de réaction en plomb permit d'en produire des centaines de litres par synthèse, au lieu de quelques litres. Ce fut donc le premier produit chimique à être produit industriellement. L'acide sulfurique a comme propriété de dissoudre tous les métaux, à l'exception de l'or et de l'argent, et était donc très utilisé pour la purification des métaux. Egalement, à la fin du XVIII<sup>ème</sup> Siècle, c'est avec l'**hydrogène** produit par la réaction entre de l'acide sulfurique et du fer que les premiers ballons à gaz s'envolèrent. Il était également utilisé pour le tannage et la teinturerie. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, l'acide fluorhydrique fut obtenu par la réaction entre de l'acide sulfurique et de la fluorite<sup>122</sup>.



A Description of New Philosophical Furnaces. J. Glauber, 1651

(gauche) Production d'acide sulfurique, Allemagne, XVII<sup>ème</sup> siècle.  
(droite) Production industrielle de l'acide sulfurique à Nordhausen, Allemagne, XIX<sup>ème</sup> siècle.



Les merveilles de l'industrie, Louis Figuier, 1873

## acide sulfurique

<sup>122</sup> La fluorite est un minerai translucide principalement composé de fluorure de calcium ( $CaF_2$ ).



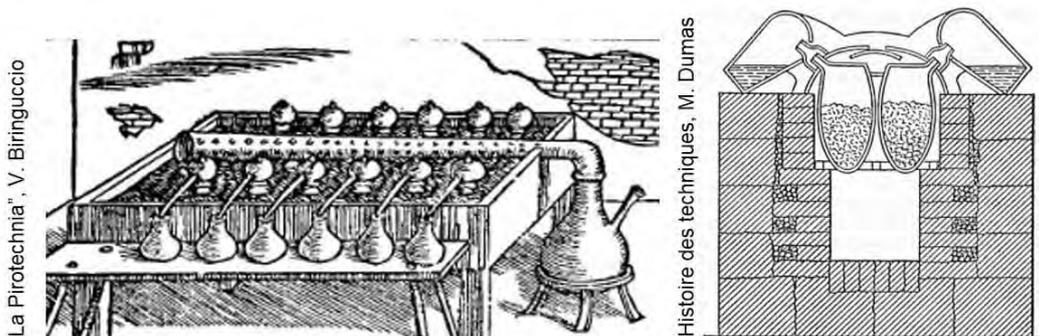
*Ballon à hydrogène, Paris, 1783*

## hydrogène

Les premières recettes de fabrication de l'**acide nitrique** ( $\text{HNO}_3$ ) datent de la fin du XIII<sup>ème</sup> siècle, et consistaient en la distillation de salpêtre avec du vitriol et/ou de l'alun (Karpenko, 2009). Il dissout l'argent, mais pas l'or, et fut donc principalement utilisé en métallurgie pour la séparation de ces deux métaux. Il fut par la suite utilisé dans d'autres industries pour le dégraissage de peau ou le nettoyage des métaux. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, une méthode alternative basée sur la distillation du salpêtre avec du soufre fut mise au point. Les vapeurs étaient condensées et récupérées dans des fioles à l'extérieur du four. La réaction entre de l'acide nitrique et du sel ammoniac conduisait à l'eau régale<sup>123</sup>, le seul acide capable de dissoudre l'or.

---

<sup>123</sup> L'eau régale est un mélange d'acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) et nitrique. La réaction pour la produire est  $4\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow 3\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{NH}_4\text{NO}_3$ .



Distillation de l'acide nitrique au XVI<sup>ème</sup> siècle (gauche) et XVIII<sup>ème</sup> siècle (droite).

## acide nitrique

L'acide chlorhydrique (HCl) fut obtenu à cette même époque par réaction entre de l'acide sulfurique et du sel, donnant également lieu à la production de sulfate de sodium<sup>124</sup>, communément appelé « sel de Glauber », qui avait des propriétés laxatives et fut utilisé en médecine. L'acide chlorhydrique permit également au XVIII<sup>ème</sup> siècle d'obtenir du dichlore (Cl<sub>2</sub>) par action sur de la pyrolusite<sup>125</sup>, et du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) par action sur le sulfure de fer<sup>126</sup> (FeS). Peu de temps après sa découverte, le dichlorure fut utilisé pour fabriquer l'eau de Javel, aux propriétés désinfectantes et blanchissantes<sup>127</sup>.

D'autres acides pouvaient être fabriqués à partir de matière organique. Ainsi, en plus du vinaigre, connu depuis les temps les plus anciens, l'acide benzoïque fut découvert au XVI<sup>ème</sup> siècle, en distillant la résine de benjoin<sup>128</sup>. Vers la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, on mit également en évidence l'acide formique (en distillant des fourmis), urique, lactique, malique (extrait des pommes), citrique, gallique (extrait des noix de galle<sup>129</sup>) et oxalique (en faisant agir de l'acide nitrique sur du sucre) (Baudet, 2004).

<sup>124</sup> La réaction est donc  $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{NaCl} \rightarrow 2\text{HCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ .

<sup>125</sup> La pyrolusite est un minéral noir essentiellement composé de MnO<sub>2</sub>. La réaction est  $4\text{HCl} + \text{MnO}_2 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{MnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

<sup>126</sup> Le sulfure de fer ne peut être trouvé dans la nature, et s'obtient en mélangeant directement du soufre et du fer.

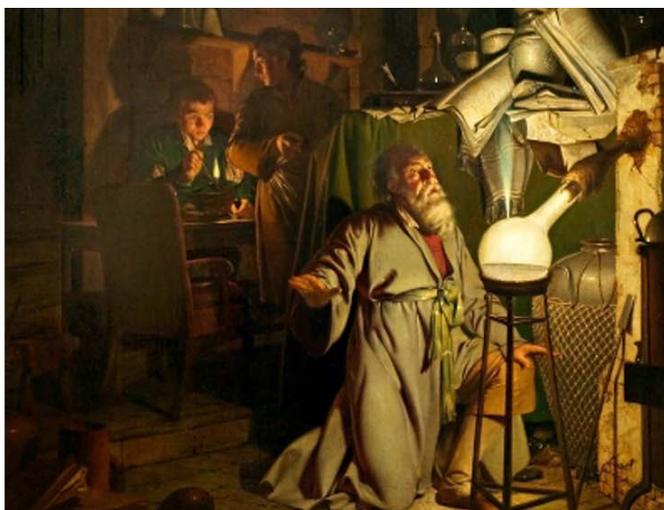
<sup>127</sup> Le dichlorure est dissous dans une eau basique contenant de la soude, suivant la réaction  $\text{Cl}_2 + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O}$ .

<sup>128</sup> Le benjoin est une résine obtenue en incisant des arbres du genre styrax. Le benjoin était utilisé pour ses vertus médicinales, et entre dans la composition d'encens, de parfum et de baumes.

<sup>129</sup> Les noix de galle sont produites par les feuilles de chêne à la suite de la pique d'un insecte qui y pond ses œufs.

Le **phosphore** fut découvert au XVII<sup>ème</sup> siècle, à la suite de la distillation d'urine. Cette méthode ne pouvait produire que de très faibles quantités. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, on découvrit une méthode permettant de le produire à partir d'os broyés, en les faisant réagir avec de l'acide<sup>130</sup>. Au XVI<sup>ème</sup> siècle, l'éther fut fabriqué à partir d'alcool et d'acide sulfurique et le protoxyde d'azote fut synthétisé à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle à partir d'acide nitrique, de fer et de cuivre (Myers, 2007). Ces deux composés furent d'abord utilisés pour un **usage récréatif** lors de fêtes au cours desquelles les gaz étaient inhalés. En Irlande, l'éther fut même pendant plusieurs décennies un substitut à l'alcool (Strickland, 1996). Ces deux composés furent utilisés comme anesthésiants à partir de 1844 (protoxyde d'azote) et 1846 (éther). Enfin, le chlorure d'étain (SnCl<sub>4</sub>) fut fabriqué au XVII<sup>ème</sup> siècle en faisant réagir de l'étain et du chlorure de mercure<sup>131</sup>. Il était utilisé comme mordant<sup>132</sup> en teinturerie.

Joseph Wright of Derby (1734-1797)



*Alchimiste découvrant le phosphore, XVII<sup>ème</sup> siècle*

## phosphore

<sup>130</sup> Les os contiennent du phosphate de calcium Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

<sup>131</sup> La réaction est  $\text{Sn} + 2\text{HgCl}_2 \rightarrow \text{SnCl}_4 + 2\text{Hg}$ .

<sup>132</sup> Un mordant est un composé qui permet de fixer certains types de colorants aux fibres. Les fibres sont d'abord plongées dans le mordant, puis la réaction entre le mordant et le colorant forme un complexe insoluble.

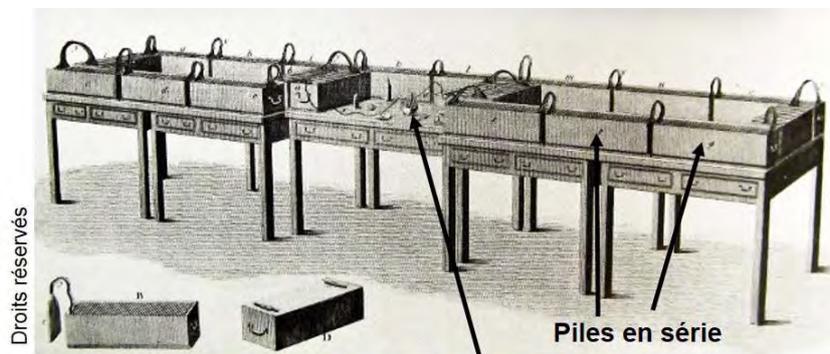


G. Cruikshank

## usage récréatif

*Fête au protoxyde d'azote, Angleterre, 1839*

En 1800, la découverte de l'**électrolyse**<sup>133</sup> permit d'isoler plusieurs éléments. En électrolysant différents matériaux, on obtint ainsi le potassium (à partir de la potasse), le sodium (de la soude), le magnésium (de la magnésie), le calcium (de la chaux), le strontium (de la strontiate), le baryum (de la baryte), le chlore (de la chlorine) (Baudet, 2004).



Droits réservés

Piles en série



Tempio Voltiano



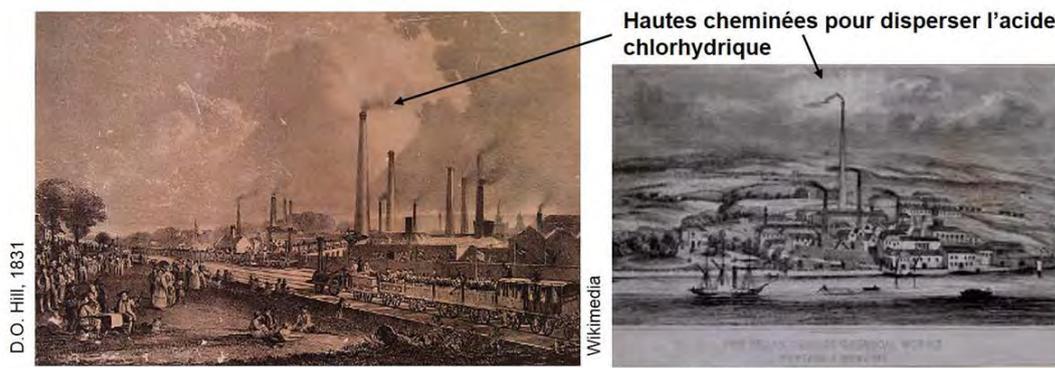
scitechantiques.com

**électrolyse** (gauche) Pile de A. Volta, Italie, 1800. (haut et droite) Système ayant permis à Humphry E. Davy d'isoler le potassium, le calcium et le magnésium, entre 1807 et 1812 (Londres), et reconstitution de son expérience de production du potassium par électrolyse de potasse.

<sup>133</sup> L'électrolyse consiste à faire circuler un courant électrique dans un liquide, permettant de le décomposer et de séparer ses constituants élémentaires.

Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, les molécules composant les corps gras furent isolées. On découvrit ainsi l'acide oléique, stéarique, margarique, la glycérine, et d'autres de la même famille. A la même époque, on arriva à bien isoler et caractériser les molécules organiques de substances végétales, et par là même les principes actifs de nombreuses composés ayant des influences sur l'organisme : quinine, cocaïne, nicotine, colchicine, morphine (Baudet, 2004). C'est également au début du XIX<sup>ème</sup> siècle que l'on arriva à extraire le sucre de la betterave.

Enfin, la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle marqua le début d'une production de soude d'origine non-végétale. Jusqu'alors, la soude en Europe provenait principalement de la barille d'Espagne, d'algues de Grande-Bretagne, ou était importée. Mais cette production ne suffisait pas à couvrir les besoins des diverses industries (textiles, savon, verreries, ...). Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, le **procédé Leblanc**, permettant de la fabriquer à partir de sel marin et d'acide sulfurique, fut mis au point<sup>134</sup>. Il présentait l'inconvénient d'être couteux en énergie et extrêmement polluant, car il conduisait au dégagement d'acide chlorhydrique gazeux, mais il fut utilisé pour la production industrielle de soude jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.



(gauche) Usine de production de soude par le procédé Leblanc, Glasgow (Ecosse), 1831.

(droite) Usine de production de soude par le procédé Leblanc, Newcastle (Angleterre), 1833.

## procédé Leblanc

### E. Textiles et cuir

La fabrication des textiles et cuirs était une des principales activités artisanales ou manufacturières du Moyen Âge, nécessitant une main d'œuvre très importante. Ainsi, en France, à l'aube de la Révolution Française, elle représentait une valeur ajoutée supérieure à l'industrie alimentaire, métallurgique ou au domaine de la construction<sup>135</sup> (Markovitch, 1966). En particulier, la fabrication drapière était une branche majeure de l'industrie textile,

<sup>134</sup> Cette méthode, dite « procédé Leblanc » nécessitait également du calcaire et produisait notamment de l'acide chlorhydrique gazeux.

<sup>135</sup> Les chiffres de la valeur ajoutée pour la période 1781-1790 sont, en millions de francs courants (1966) : 136 pour la métallurgie, 842 pour les textiles, 57 pour le cuir, 518 pour les industries alimentaires, 665 pour la construction, 286 pour le bois.

en raison du temps important requis pour la fabrication des draps. A titre d'illustration, voici la liste des étapes que comporte la fabrication des draps de laine au XVIII<sup>ème</sup> siècle (Diderot, 1751 ; Belhoste, 1994): dégraissage de la laine dans une chaudière avec de l'eau et de l'urine ; lavage plusieurs fois à l'eau ; cardage ; filage ; tissage du drap; épinsage<sup>136</sup> ; foulage des draps pendant plusieurs heures dans un mélange d'eau, terre, urine, ou savon, afin de resserrer les fibres ; répétition des deux étapes précédentes ; plusieurs opérations successives de lainage<sup>137</sup> aux chardons et de tonte ; brossage avec des brosses faites de racines de chiendent, soies de cochons ou de sanglier ; presse à chaud des draps. Les opérations les plus gourmandes en temps et main d'œuvre ont fait l'objet d'une mécanisation à partir du X<sup>ème</sup> siècle. Nous allons présenter dans un premier temps les évolutions ayant eu lieu dans les procédés de fabrication des textiles les plus courants. La mécanisation liée au travail du cuir, de la soie et au tricot sera présentée dans un second temps.

Les matériaux utilisés pour le textile au Moyen Âge étaient principalement la laine, le lin, le chanvre, le coton et la soie, avec une prédominance de la laine. La soie se répandit progressivement en Occident entre le X<sup>ème</sup> et le XIII<sup>ème</sup> siècle. La laine était **peignée**<sup>138</sup> au début du Moyen Âge, puis **cardée**<sup>139</sup> à partir du XIV<sup>ème</sup> siècle. En ce qui concerne l'opération de **filage**, la méthode traditionnelle au fuseau et à la quenouille était utilisée au début du Moyen Âge. Le premier appareil ayant permis l'augmentation de la productivité du filage est le **rouet « à grande roue »**, apparu au XIII<sup>ème</sup> siècle. Doté d'une roue et d'une manivelle, il permettait la rotation à haute vitesse du fuseau. Son opération nécessitait d'enchaîner de manière séquentielle une phase de torsion du fil, puis une phase de bobinage du fil formé sur le fuseau. Les rouets à **épinglier**, apparus au XV<sup>ème</sup> siècle, combinaient, eux, torsion du fil et bobinage. Ils ne devinrent d'un usage courant qu'à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle. Enfin, les **rouets à pédales**, qui ne semblent pas être apparus avant le XVII<sup>ème</sup> siècle, permettaient l'entraînement de la roue grâce à un système bielle-manivelle, libérant ainsi les deux mains. L'augmentation de la vitesse de filage entre la méthode traditionnelle (fuseau et quenouille) et l'utilisation du rouet à épinglier est de l'ordre d'un facteur 5 ou 6 (Endrei, 1971). Néanmoins, il semblerait que le fil produit par le rouet était de qualité moindre que celui filé à la main, ce qui explique qu'il ait parfois été interdit pour certains ouvrages. L'usage du rouet, d'abord présent dans les villes, se répandit ensuite dans les campagnes. Dès le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, le filage vit la naissance de machines perfectionnées, motivée par le fait que la forte augmentation de productivité dans le tissage due à la navette volante (voir plus bas) ne permettrait pas d'économie significative en main d'œuvre sans une augmentation similaire dans le filage, qui devenait

---

<sup>136</sup> L'épinsage consiste à ôter à l'aide d'une pince les défauts du drap (nœuds, fibres).

<sup>137</sup> Le lainage consiste à frotter le drap à l'aide d'un chardon, afin d'ébouriffer les fibres, et à couper les bouts de fibres dépassant lors de la tonte.

<sup>138</sup> Avant d'être filée, la laine est peignée afin d'aligner les fibres et d'ôter les fibres les plus courtes.

<sup>139</sup> Le cardage a le même objectif que le peignage, mais utilise des sortes de brosses faites de planches plantées de clous.

l'étape limitante. Ainsi, la *spinning-jenny*, mise au point en 1765, était un rouet perfectionné permettant la rotation de huit broches à la fois. Surtout, dans cette machine, pour la première fois, la main de la fileuse ne servait plus à filer, mais uniquement à faire tourner la manivelle, son geste millénaire étant désormais reproduit par la machine. Quelques années plus tard, apparut le *water-frame*, mu par un manège de chevaux ou la force hydraulique, et utilisant un autre principe pour le filage. Ces deux premières machines ne produisaient pas encore un fil de grande qualité. La *mule-jenny* apparut en 1779 et combinait les avantages des deux machines précédentes, produisant un fil de qualité. Certains modèles, mus par la force hydraulique, pouvaient actionner jusqu'à 400 broches à la fois.



Kumanovo museum

Peignes à laine

## peignée



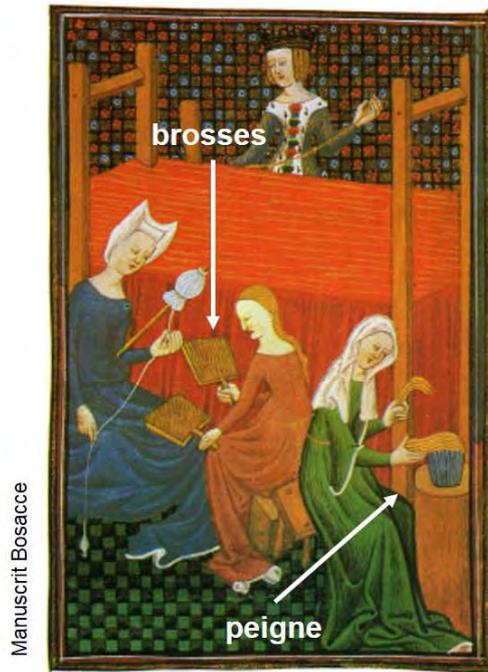
Psautier de Luttrell, 1320-1340

Brosses

Droits réservés

(gauche) Cardage, Angleterre, XIV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Brosses à carder.

## cardée



Cardage, peignage et filage de la laine, XV<sup>ème</sup> siècle

**filage**

Métamorphose, Ovide, Bib. De Lyon, 1385



Psautier de Luttrell, 1320-1340



Les Vies des Femmes. Musée Dobrée – Grand patrimoine de Loire-Atlantique

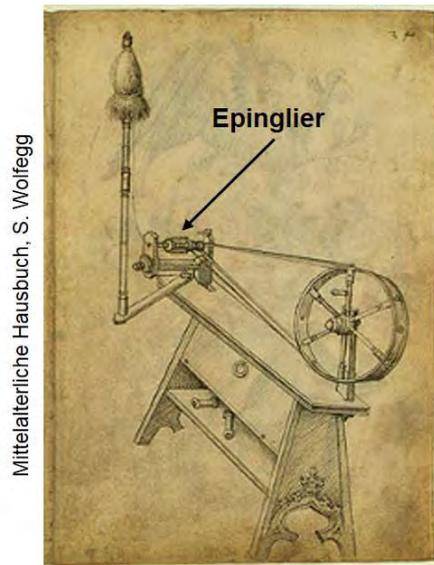


Maerten Van Heemskerck



Rouet à grande roue. France (haut à gauche) et Angleterre (haut à droite), XIV<sup>ème</sup> siècle. France (bas à gauche) et Pays-bas (bas à droite), XVI<sup>ème</sup> siècle.

**rouet « à grande roue »**



(gauche Rouet à épinglier, Allemagne, 1480. (droite) Epinglier moderne.

## épinglier



(gauche) Rouet à pédales, Pays-bas, 1657. (milieu) Rouet à pédales, Pays-bas, environ 1725. (droite) Rouet, peint en 1889 d'après un dessin de J.-F. Millet de 1853 (France).

## rouets à pédales



(gauche) Spinning Jenny, 1770. (droite) Réplique d'une « spinning Jenny ».

## spinning-jenny

## water-frame

Science Museum/Science & Society Picture Library



« Water frame » par son concepteur, 1775.

Musée des arts et métiers, Sylvain Pelly



Filature des Calquières



(gauche) « Mule Jenny », 1810. (droite) « Mule Jenny » de grande taille, 1825.

## mule-jenny

Pour ce qui est du tissage, le **métier à pesons** de l'Antiquité perdura au moins jusqu'au XII<sup>ème</sup> siècle. A partir du IX<sup>ème</sup> ou X<sup>ème</sup> siècle, le **métier à pédales**, horizontal, arriva en Europe depuis l'Orient. Les pédales permettaient de soulever les différentes lisses<sup>140</sup>, ce qui accélérât le travail, et permettait de créer des motifs complexes en rajoutant plusieurs pédales. Pendant la période de cohabitation entre les deux types de métier, le métier à pesons semblait être plutôt réservé à un travail domestique rural et le métier à pédale à un travail professionnel urbain (Endrei, 1971). Un domaine particulier du tissage, la rubanerie, subit une mécanisation précoce, motivée par le fait qu'un métier à tisser standard ne permettait le tissage que d'un seul ruban. Ainsi, au tout début du XVII<sup>ème</sup> siècle, une machine permettant le tissage simultané de **plusieurs rubans** à la fois apparut en Hollande, et fut rapidement utilisée en Suisse. Dès 1621, le modèle développé en Suisse permettait le tissage de 24 rubans unis à la

<sup>140</sup> La lisse est la pièce du métier à tisser permettant de séparer les fils de chaînes pour faciliter le passage du fil de trame.

fois, en n'étant actionné que par un seul ouvrier (Von Steiger, 2012). Dans le domaine du tissage de pièces, c'est le **métier à navette volante**, apparu en 1733, qui conduisit à une forte augmentation de la productivité. Il était basé sur un système de poussoirs et taquets actionnés manuellement, permettant de lancer la navette d'un bout à l'autre du métier. De grandes pièces pouvaient ainsi être tissées avec une vitesse quatre fois plus importante.



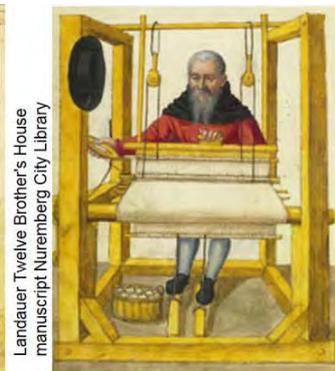
Psauteur d'Utrecht

*Métier à pesons, Pays-Bas, IX<sup>ème</sup> siècle*

## métier à pesons



Weaver, Nürnberg, 1425



Landaauer Twelve Brothers House  
manuscript Nuremberg City Library

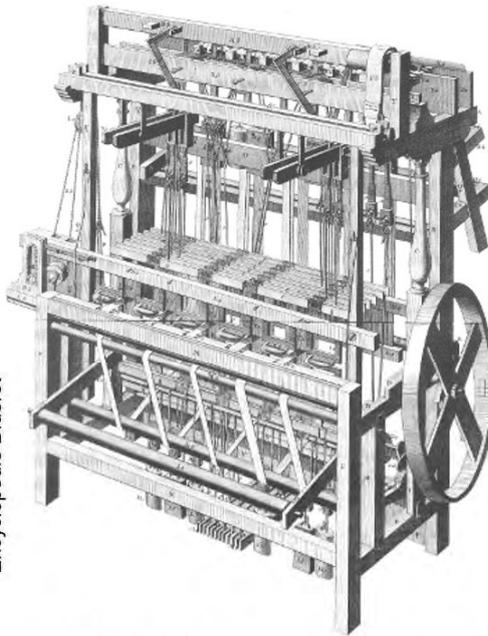


ompagnons-duellistes.fr

*(gauche et milieu) Métier à pédales, Allemagne, XV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Reconstitution d'un métier à pédales.*

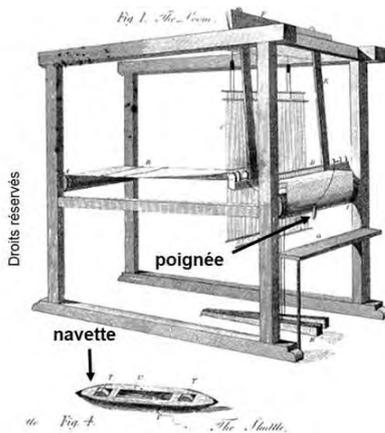
## métier à pédales

Encyclopédie Diderot

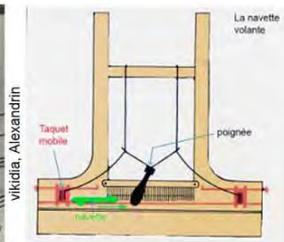


Métier à tisser plusieurs rubans à la fois, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

## plusieurs rubans



The Romance of the Nation, 1925



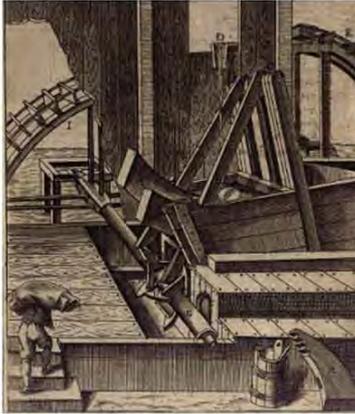
Métier à tisser à navette volante et son principe, Angleterre, 1733.

## métier à navette volante

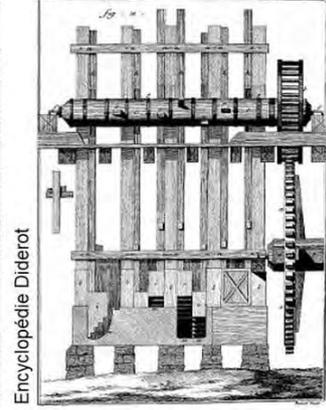
Le foulage est une étape longue et indispensable à la confection des draps, permettant notamment de resserrer les fibres. Le **moulin à foulon**<sup>141</sup>, qui apparut en Italie au X<sup>ème</sup> siècle, effectuait le même travail que quelques dizaines d'ouvriers. Il était constitué d'un arbre à came solidaire de la roue du moulin, permettant de soulever des maillets venant frapper lors de leur redescente les draps placés dans une cuve. Il se répandit progressivement en Europe dans les siècles qui suivirent, ne devenant vraiment courant qu'au XVI<sup>ème</sup> siècle (Azéma, 2007).

<sup>141</sup> Le moulin à foulon, comme son nom l'indique, permet de mécaniser certaines actions qui étaient auparavant réalisées par un foulage aux pieds.

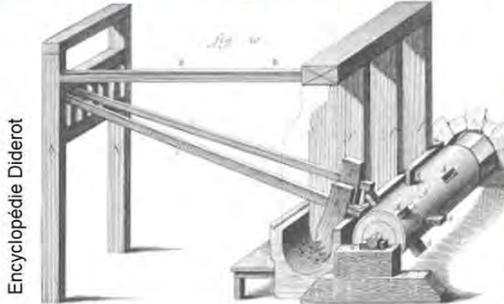
Novo teatro di machine et edificii, V. Zonca, 1607



Dessins artificieux de toutes sortes ...  
Jacobus Strada, 1617



Encyclopédie Diderot



Encyclopédie Diderot

Michel Argov, argov.perso.sfr.fr

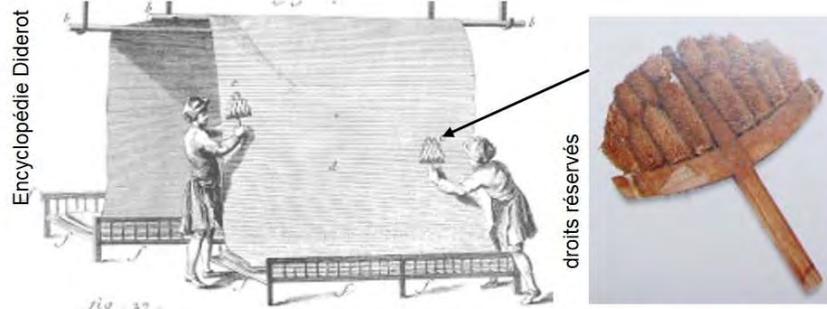


(en haut à gauche et milieu) Moulin à foulon, XVII<sup>ème</sup>. (en haut à droite et en bas à gauche) Moulin à foulon, XVIII<sup>ème</sup> siècle. (en bas à droite) Moulin de Lacort, Aragon.

## moulin à foulon

Le lainage des draps était traditionnellement effectué manuellement avec un outil composé de **têtes de chardons**. Au XVII<sup>ème</sup> siècle, une **machine à lainer**<sup>142</sup> les draps, mue par deux humains, fut développée. De conception relativement simple, elle permettait d'entraîner les draps avec des cylindres, pendant qu'un autre cylindre recouvert de têtes de chardon frottait le drap, les deux mouvements n'étant pas synchronisés. Pour l'anecdote, on peut noter que la présence de têtes de chardons dans les machines industrielles à lainer les draps perdura jusqu'à la fin du **XIX<sup>ème</sup> siècle**. Une machine hydraulique, qui ressemble aux machines à lainer les draps et servant à **friser les étoffes**, existait au XVIII<sup>ème</sup> siècle. L'opération de frisage, uniquement cosmétique, consistait à tirer à l'aide de pointes sur les fils de l'étoffe, formant à sa surface de petites boucles donnant un aspect velouté. La machine assurait la synchronisation entre deux mouvements, l'un de rotation de cylindres permettant l'avancement des draps, et l'autre de translation d'une plaque en contact avec les draps. Cette machine pouvait être actionnée par un manège ou par une roue hydraulique.

<sup>142</sup> Le lainage consiste à frotter les draps avec des outils dotés de chardons pour faire ressortir les poils.



Lainage manuel à l'aide d'une croix à chardons

## têtes de chardons



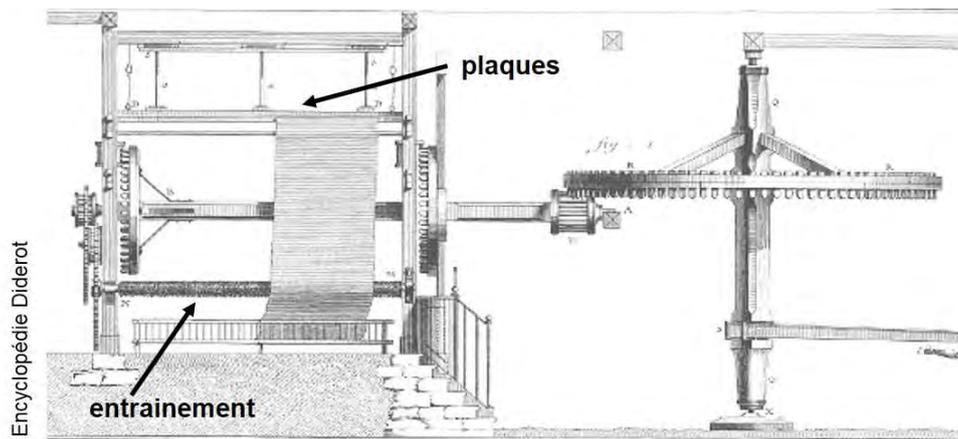
Machine à lainer, non synchronisée, Italie, 1607.

## machine à lainer



Machine à lainer industrielle, fin XIX<sup>ème</sup> siècle : les chardons sont toujours là!

## XIX<sup>ème</sup> siècle



*Machine à friser les étoffes, XVIII<sup>ème</sup> siècle. Deux mouvements synchronisés : l'avancement du drap et la rotation d'une plaque recouverte de pointes formant les frisures.*

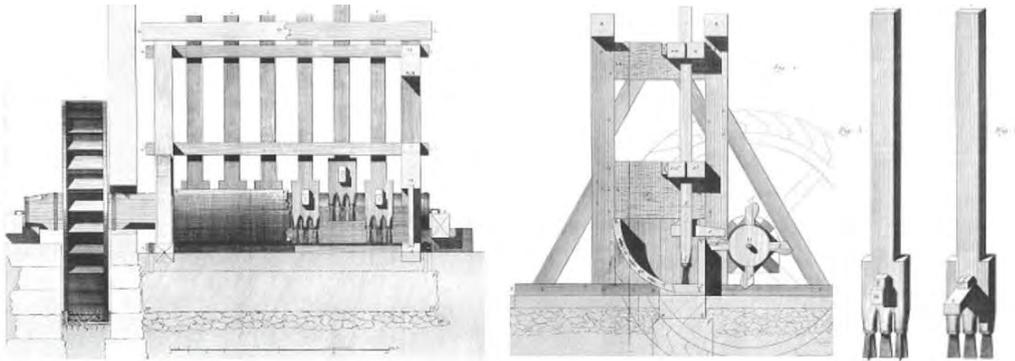
## friser les étoffes

Nous allons maintenant présenter des éléments concernant la fabrication du cuir, de la soie, et du tricot. Au Moyen Âge, le principe et les méthodes du travail du cuir étaient en de nombreux points assez similaires à celles utilisées dans l'Antiquité. Les premières étapes étaient un salage et un séchage, afin de déshydrater la peau. Suivaient plusieurs étapes dites du « travail de rivière », qui permettaient d'ôter de la peau les poils, l'excès de graisse, de la nettoyer et l'assouplir. Parmi ces étapes, le pelanage<sup>143</sup> utilisait de la chaux ou du natron<sup>27</sup>. On utilisait principalement du tan<sup>144</sup> ou de l'écorce de châtaigner pour l'étape du tannage proprement dit. A partir du VIII<sup>ème</sup> siècle, les musulmans, au moment de la conquête de l'Espagne, apportèrent en Europe le tannage à l'alun<sup>54</sup>. Deux étapes de la fabrication du cuir ont été mécanisées. La première est la fabrication du tan à partir d'écorces, qui fut effectuée à partir du XII<sup>ème</sup> siècle dans des **moulins à tan**. Ces derniers permettaient de broyer les écorces à l'aide d'outils tranchants fixés sur des colonnes en bois qui étaient soulevées puis laissées choir sur les écorces par l'intermédiaire d'un arbre à cames. La deuxième était le travail d'assouplissement final des cuirs dans l'huile, qui pouvaient concerner les peaux d'ovins comme de bovins, et était réalisé dans des **moulins à chamoiser** assez semblables aux moulins à foulon utilisés pour les draps.

<sup>143</sup> Le pelanage est l'étape qui consiste à enlever les poils.

<sup>144</sup> Le tan est de l'écorce de chêne en poudre.

Encyclopédie Diderot

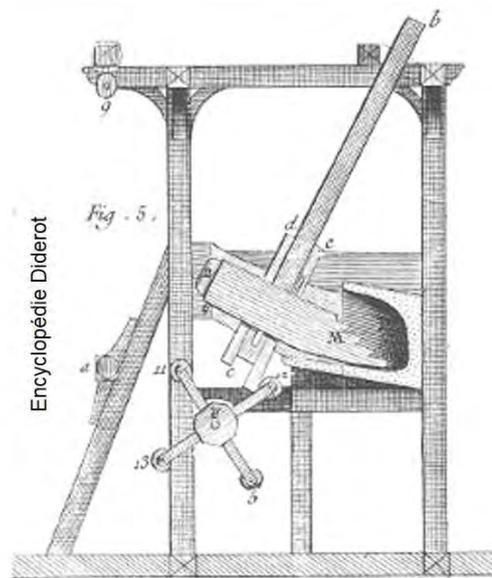


moulinsdefrance.org



(haut) Moulin à tan, XVII<sup>ème</sup> siècle. (droite) Moulin à tan, Lezazien (Finistère), 1811.

## moulins à tan



Moulin à chamoiser, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

## moulins à chamoiser

Concernant la soie, l'obtention des fils est très spécifique puisqu'il s'agit de dévider le fil – dont la longueur est de l'ordre du kilomètre – constituant les cocons, et d'en entortiller plusieurs ensemble afin de former le fil final. En particulier, la fabrication de l'organsin<sup>145</sup> de soie nécessitait que chaque brin soit très fortement tordu (environ 800 tours pour 10 cm de fil). Cette opération a

<sup>145</sup> L'organsin est le fil utilisé pour la chaîne lors du tissage, qui se doit d'être particulièrement robuste. Il est composé de deux brins de soie faiblement torsadés ensemble, chaque brin étant par contre très fortement tordu sur lui-même.

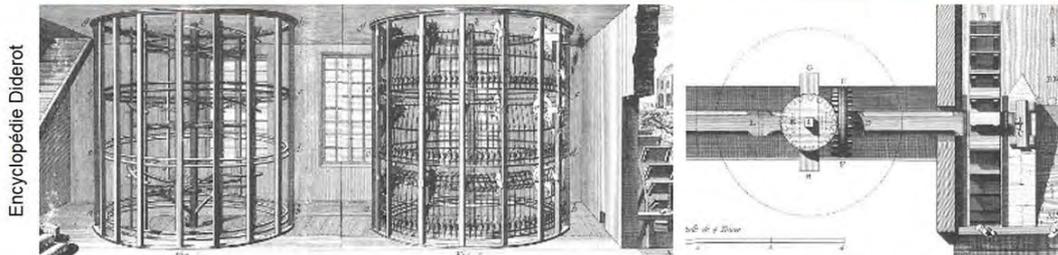
donné lieu à la fabrication en Italie au XVI<sup>ème</sup> siècle de spectaculaires **métiers à organsiner**, qui permettaient de mettre en rotation des centaines de fuseaux simultanément.



Museo del Patrimonio Industriale, Bologne



M. Favareille, Musée des arts et métiers, CNAM

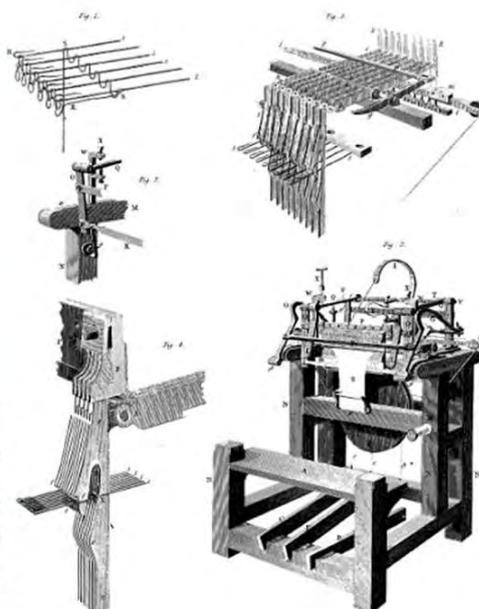


Encyclopédie Diderot

(en haut à gauche) Métier à organsiner, Italie, XVI<sup>ème</sup> siècle. (en haut à droite) Métier à organsiner, France, 1741. (bas) Métier à organsiner (milieu), son mécanisme interne (gauche), et son système d'entraînement (droite).

## métiers à organsiner

Enfin, une autre évolution technologique dans ce domaine reste la **machine à tricoter**, dont l'usage se développa au cours du XVII<sup>ème</sup> siècle. Elle était dotée d'un mécanisme complexe et de dizaines d'aiguilles, qui permettaient de tricoter une rangée de mailles simultanément à la suite de cinq opérations élémentaires de l'opérateur. La machine permettait de tricoter bonnets, bas, et gants pour l'aristocratie, et pouvait utiliser de la laine, du coton, ou de la soie. Si les machines décrites jusqu'ici étaient d'imposantes machines constituées principalement de bois, la machine à tricoter comportait de nombreuses petites parties métalliques, indispensables pour un tel mécanisme de précision.



(gauche) Machine à tricoter, 1770. (droite) Mécanisme de la machine à tricoter, 1810 .

## machine à tricoter

### F. Construction et fabrication

Dans cette partie, après une brève présentation des techniques de construction au Moyen Âge, qui ne subirent pas de modifications radicales par rapport à celles de l'Antiquité, nous nous attarderons plus longuement sur les techniques de travail du bois et des métaux.

Les maisons du Moyen Âge étaient pour la plupart basées sur une **structure en bois** remplie par de la terre, du plâtre ou du torchis. La structure en bois était basée sur l'utilisation de bois longs et de large section. Toutes les charpentes se faisaient alors sans usage de métal. On ne trouvait des clous que dans certaines huisseries. Entre le XIV<sup>ème</sup> et le XVI<sup>ème</sup> siècle, les arbres de haute futaie<sup>146</sup> devenaient plus rares, et les techniques de fabrication des maisons évoluèrent et durent s'adapter à l'utilisation de bois de longueur moindre – correspondant à la hauteur d'un étage – et de section plus faible. C'est ainsi qu'apparurent les **maisons à colombages et à encorbellements**<sup>147</sup>.

<sup>146</sup> Obtenir des arbres à large section et hauts nécessite de les laisser croître pendant une centaine d'années dans des zones de la forêt appelées futaies. La surexploitation des forêts et en particulier de ces arbres conduisit à leur raréfaction.

<sup>147</sup> Dans les maisons à encorbellements, les étages ont une surface plus élevée que le niveau sur lequel il repose, et ont donc une partie qui surplombe la rue.



Village de Merliand, BNF

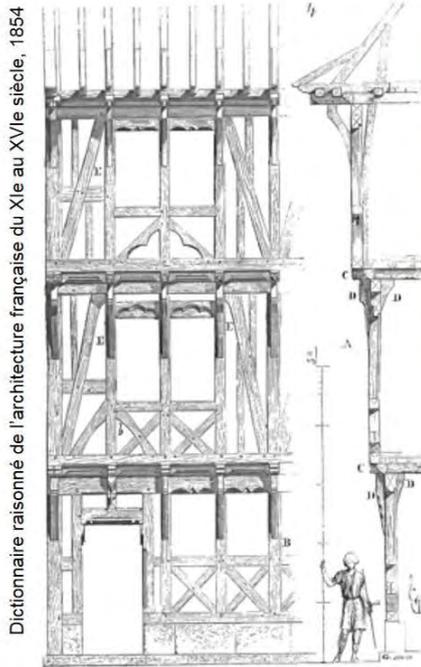


Cathédrale de Teruel



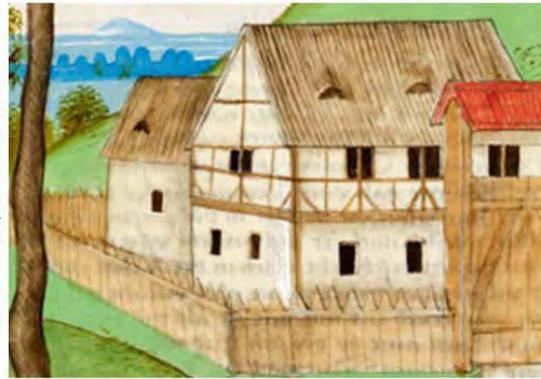
(gauche et milieu) Reconstruction d'une maison et de sa structure, Bretagne, X<sup>ème</sup>-XIV<sup>ème</sup> siècle.  
(droite) Charpentiers, Espagne, XIV<sup>ème</sup> siècle

## structure en bois



Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle, 1854

Fablets de Biopai, musée Condé



(gauche) Ossature maison à colombage et encorbellement, Chateaudun, fin XII<sup>ème</sup> siècle.  
(droite) Maison rurale médiévale, XV<sup>ème</sup> siècle.

## maisons à colombages et à encorbellements

Concernant les constructions en  **Pierre**, les maçonneries à joint vif<sup>148</sup> étaient encore utilisées, mais la majorité des constructions utilisaient du **mortier**. Le travail des pierres était effectué à l'aide de pics, de pointerolles<sup>149</sup> et maillets. Leur équarrissage<sup>150</sup>, à partir du XII<sup>ème</sup> siècle, était effectué avec un **taillant à brettures**<sup>151</sup>. Comme dans l'antiquité, la pierre était réservée aux édifices imposants (châteaux, églises, ponts, etc), ce qui nécessitait des engins de levage. Ces derniers étaient semblables à ceux utilisés dans l'empire romain ; on utilisait ainsi des **chèvres**, et les **grues** utilisées dans les chantiers d'importance étaient actionnées par des cages d'écureuil, dans lesquelles marchaient des humains. On peut également noter l'apparition au XIII<sup>ème</sup> siècle de la **brouette**, particulièrement utile pour les **chantiers** !

<sup>148</sup> L'assemblage de pierres à joint vif se fait sans mortier.

<sup>149</sup> La pointerolle est une barre métallique rigide terminée par une pointe.

<sup>150</sup> L'équarrissage consiste à transformer la pierre grossièrement taillée en un parallélépipède.

<sup>151</sup> Le taillant à brettures est proche de la hache mais avec un bout moins tranchant comportant des dents.

**pierre**

Légende dorée, BnF



Tailleurs de pierre, 1485

Compendium historial, BnF



Histoire d'Alexandre, roi de Macédoine, BnF



Salomon et la construction du Temple, Bib. De Valenciennes



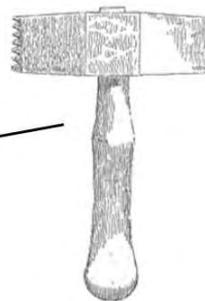
**mortier**

(haut) Taloche, truelle et mortier, XV<sup>ème</sup> siècle. (bas) Fabrication du mortier et maçonnerie, au XV<sup>ème</sup> siècle (gauche) et au XVI<sup>ème</sup> siècle (droite).

Compilation d'histoire ancienne, BnF



Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle, 1854



Equarissage de pierre au taillant à bretures, 1365

**taillant à bretures**

**chèvres**

Chronique de Speiez, bib. de Berne, 1485

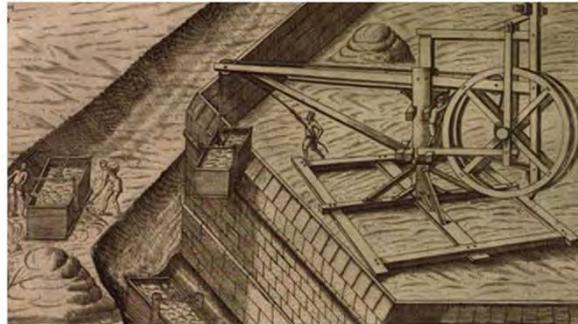


Chèvre à trois pieds, 1485

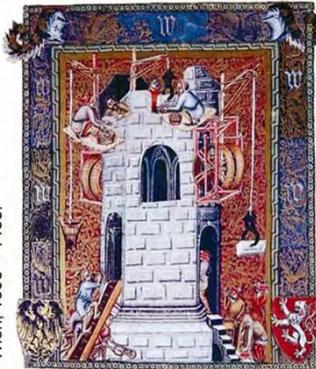
Chronique de Speiez, bib. de Berne, 1485



Novo teatro di machine, V. Zonca, 1607



Václavova bible, National Bibliothek, Wien, 1390 – 1400.



Simon Bening, 1481-1561



handshouse.org



**grues**

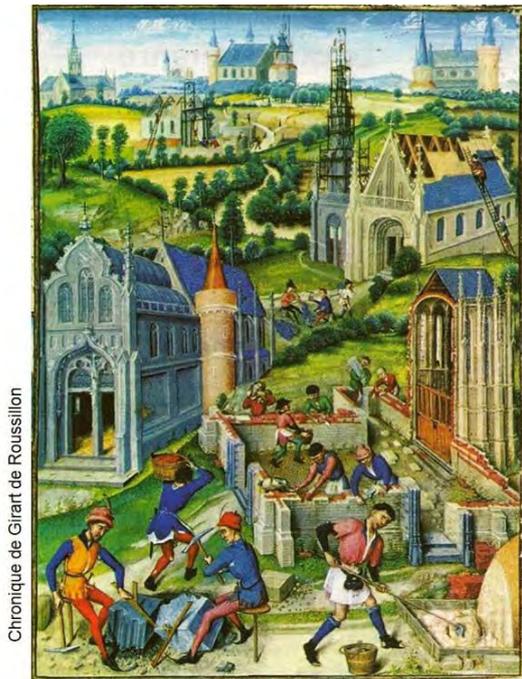
(en haut à gauche) Construction d'un pont, Suisse, 1485. (en haut à droite) Grue, Italie, 1607. (en bas à gauche) Illustration de la construction de la tour de Babel, Vienne, 1400. (en bas au milieu) Marché aux vins, Bruges (Belgique), XV<sup>ème</sup> siècle. (en bas à droite) Reconstitution des grues au château de Prague.

**brouette**

Histoire du Grand Alexandre, BNF, 1470



Brouette à sangles, 1470



Chronique de Girart de Roussillon



Maître de Bedford, British Library

(gauche) Construction d'églises, 1450 .(droite) Représentation de la construction de la tour de Babel, 1420

## chantiers

Les **toits** des maisons pouvaient être faits de chaume, jonc, roseau, bois, gazon, ardoise ou tuiles. Les couvertures végétales dominaient au début du Moyen Âge, le retour de la tuile s'effectuant à partir du XI<sup>ème</sup> ou XII<sup>ème</sup> siècle (de Boüard, 1965 ; Decaëns, 1972). Dans les villes, certaines réglementations interdisant les toits végétaux apparurent à partir du XIII<sup>ème</sup> siècle afin de limiter les risques d'incendies, conduisant ainsi à une utilisation accrue de la tuile et de l'ardoise. En ce qui concerne les **fenêtres**, elles restèrent pendant longtemps dans les maisons ordinaires de simples ouvertures dans les murs fermées par des volets en bois. Dans les bâtiments officiels ou les châteaux, à partir du XIV<sup>ème</sup> siècle, on commença à utiliser de la toile cirée translucide montée sur un châssis, du papier huilé, puis du verre. Ces systèmes ne se répandirent dans les maisons ordinaires que vers la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle (Lagabrielle, 2005 ; Philippe, 2005 ; Woronoff, 2005).

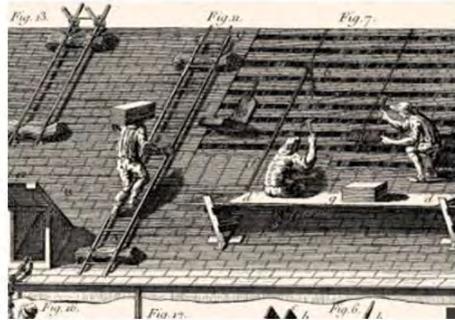


wikimedia, coyau

histoire-en-maquette.com



Art du couvreur, Duhamel Du Monceau, 1766



## toits

(gauche) Toit en essentes –des tuiles de bois–, Provins, France, XI<sup>ème</sup> siècle. (en haut à droite) toit en chaume, d'une ferme, France, VII<sup>ème</sup> siècle. (en bas à droite) Couverture d'ardoise, 1766.

Les quatre Etats de la société, etc..., Ecole des Beaux-Arts, RMN / Agence Bulloz



## fenêtres

Volet en bois et fenêtre vide, XV<sup>ème</sup> siècle

Les outils pour le travail grossier du bois restaient l'herminette, la **scie**, et le rabot. A partir du XIII<sup>ème</sup> siècle, des **scies hydrauliques** permettant de débiter des troncs en planches sont rapportées. Elles actionnaient des scies tout en faisant avancer le tronc. Au XVI<sup>ème</sup> siècle, des **machines à forer les troncs** furent également développées ; elles aussi assuraient à la fois la rotation d'une tête munie d'un forêt et l'avancement du tronc, placé horizontalement, à l'aide d'une roue à cliquet<sup>152</sup>. Concernant le travail plus fin du bois, on peut noter l'apparition du premier **tour à perche** au XI<sup>ème</sup> siècle. Il était doté d'une pédale qui permettait à l'artisan de faire tourner le tour dans un sens par un système de courroie et poulie. Le rappel se faisait grâce à une perche flexible située au-

<sup>152</sup> La présence du cliquet dans une roue empêche cette dernière de tourner en sens contraire au mouvement souhaité.

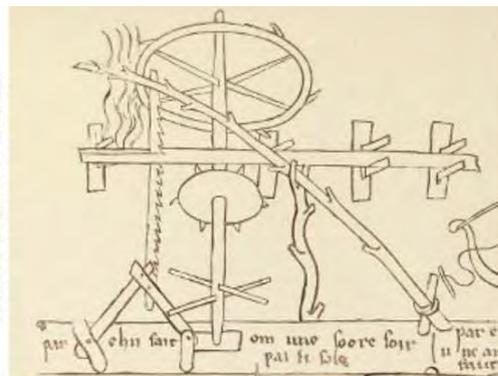
dessus du tour, elle aussi reliée au tour par une ficelle. La scie à ruban, dont l'existence est attestée au XIII<sup>ème</sup> siècle, était basée sur le même principe. A partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, deux alternatives à la perche furent introduites pour actionner les tours. Dans la première, une **grande roue**, actionnée par un manœuvre, entraînait le tour en continu par un système de courroie. Dans une autre approche, la rotation s'effectuait à l'aide d'une **pédale**, d'un système bielle-manivelle, et d'un volant d'inertie. Ce système présente, comme le tour à perche, l'avantage de pouvoir être actionné par le seul tourneur. C'est également de cette époque que datent les premières tentatives de fixer l'outil au tour, et d'assujettir le mouvement de translation de l'outil au mouvement de rotation du tour, de manière à pouvoir **fileter** de manière plus rapide des vis en bois. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la **diversité des outils**, des techniques, et des types de tours était très grande : le tournage du bois ou de l'**ivoire**, qui était à la fois un **art noble** et une technique de fabrication, atteignait son apogée, et permettait de fabriquer des pièces d'une grande complexité (Plumier, 1750).



Cathédrale de Teruel, Espagne

Sciage manuel d'un tronc, XIII<sup>ème</sup> siècle

**scie**

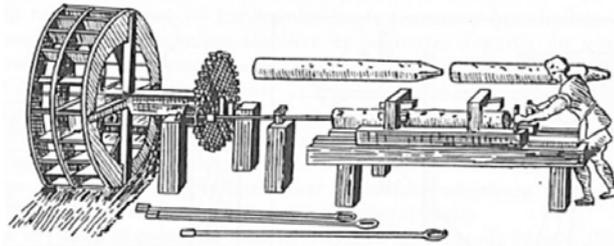


Facsimile of the Sketch-  
Book of Wilars de Honcourt

Scie hydraulique, XIII<sup>ème</sup> siècle.

**scies hydrauliques**

Histoire des techniques,  
M. Dumas



*Machine à forer les troncs, XVI<sup>ème</sup> siècle*

## **machines à forer les troncs**

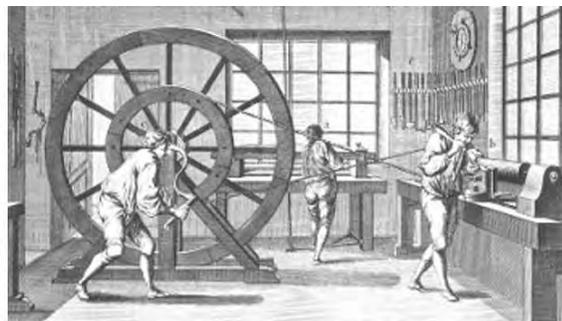


atelierdoutournage.com

*Reconstitution d'un tour à perche.*

## **tour à perche**

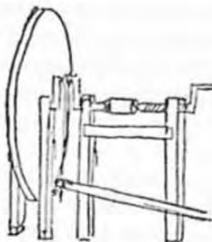
Encyclopédie Diderot



*Grande roue dans un atelier de tourneur, XVII<sup>ème</sup> siècle.*

## **grande roue**

Leonard de Vinci

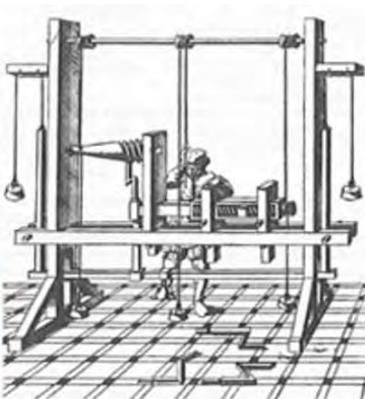


*Tour à pédale, volant d'inertie et bielle/manivelle, 1500.*

## **pédale**

**fileter**

Théâtre des instruments ...etc  
Jacques Besson, 1578

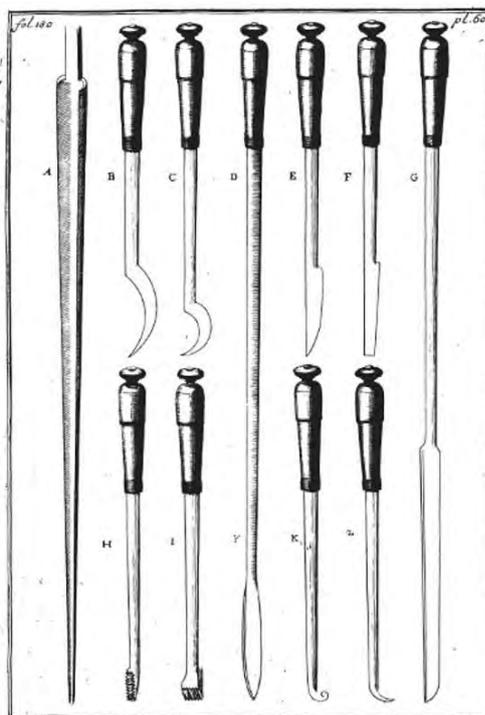


Tour à fileter les vis, XVI<sup>ème</sup> siècle.

L'art de tourner, Charles Plumier, 1750



(gauche) Tarauds et filières pour la fabrication des vis et écrous, XVIII<sup>ème</sup> siècle.  
(droite) Outils de coupe, XVIII<sup>ème</sup> siècle.



**diversité des outils**

Palais Pitti, Florence



Ivoires tournés, Florence, 1620

**ivoire**

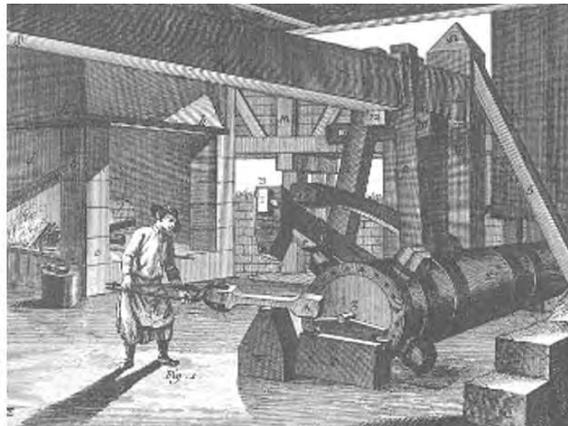


Château de Rosenborg

Tour ornemental, Danemark, 1736

## art noble

En ce qui concerne le fer, le **martinet**<sup>103</sup>, déjà connu en Chine depuis les premiers siècles de notre ère, et également chez les Grecs et les Romains, fit son retour en Occident au cours du XII<sup>ème</sup> siècle. Dans le martinet, il y a souvent la combinaison entre l'action d'un arbre à came qui soulève le marteau et celle d'un ressort qui impulse la redescente, la seule gravité ne suffisant pas à assurer un fonctionnement convenable. La position de la came par rapport au marteau définit les différents types de martinets : terminal<sup>153</sup>, frontal ou latéral<sup>154</sup>. Les deux derniers permettent d'utiliser des marteaux plus lourds et apparurent vers le XVI<sup>ème</sup> siècle. Comme nous l'avons vu plus haut, le martinet était utilisé au départ pour le cinglage<sup>41</sup> du fer issu des bas fourneaux, et il fut par la suite également utilisé pour le cinglage du fer issu de l'affinage de la fonte. Son usage s'est également étendu à la **forge** de grosses pièces, pour laquelle on utilisait différentes formes de marteaux et d'enclumes en fonction de la pièce fabriquée. Les plus grosses pièces forgées à cette époque étaient les ancres de navires.



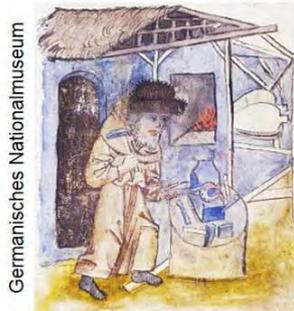
Encyclopédie Diderot

Martinet latéral et forge d'une ancre, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

## martinet

<sup>153</sup> Dans le martinet terminal, la came *appuie* sur l'extrémité de la poutre qui n'est pas dotée du marteau. La poutre étant fixée sur un axe, le marteau se soulève.

<sup>154</sup> Dans les martinets latéraux ou frontaux, la came est située à proximité du marteau et *soulève* la poutre. Dans le latéral, la came est située perpendiculairement à la poutre ; dans le frontal, la came est dans l'axe de la poutre, après le marteau.



Germanisches Nationalmuseum

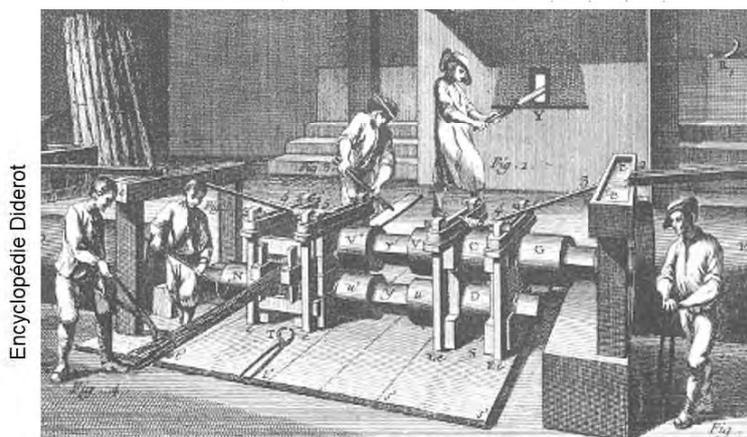
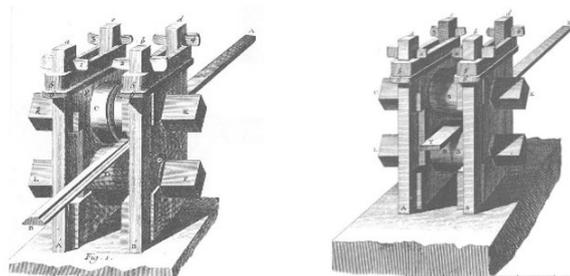
BNF, 1613



(gauche) Forgeron, 1506, Allemagne. (droite) Forge itinérante, 1613, France.

## forge

Le fer issu des forges était ensuite mis en forme dans différents ateliers spécialisés, notamment les fenderies<sup>155</sup>, taillanderies<sup>156</sup>, tréfileries<sup>157</sup> et clouteries. A partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, des machines hydrauliques apparurent dans ces ateliers. Ainsi, dans les **fenderies**, on transformait des barres de fer en ruban, en les chauffant au rouge, puis en les passant entre des cylindres d'espacement décroissant entraînés par des roues hydrauliques. La découpe finale des rubans se faisait à l'aide de cylindres coupants. Dans les **fenderies de cuivre** ou de zinc, des plaques étaient obtenues par martelage à l'aide de pilons hydrauliques, et la découpe de bandes effectuée à l'aide de cisailles géantes.



Encyclopédie Diderot

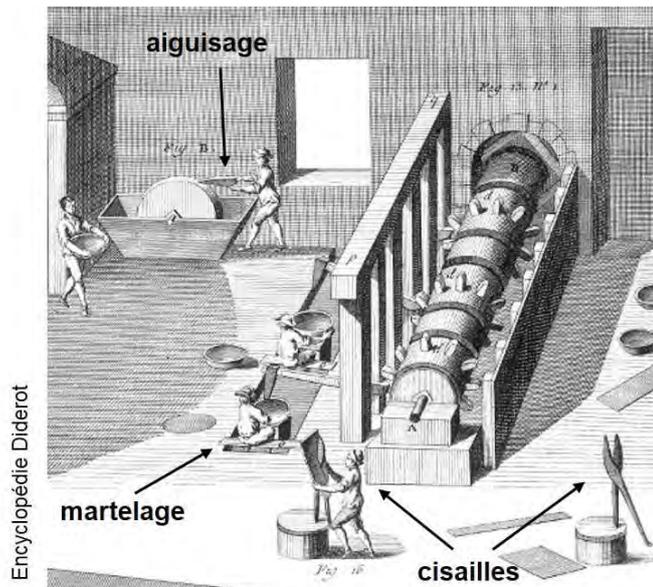
## fenderies

(bas) Fenderie hydraulique pour le fer, XVIII<sup>ème</sup> siècle (haut) Des cylindres pour profiler (gauche) et aplatir (droite) sont détaillés.

<sup>155</sup> Dans les fenderies, on fabrique des rubans de métal.

<sup>156</sup> Dans les taillanderies, on fabrique tous les outils tranchants : faux, bèches, rabots, pics, haches, etc.

<sup>157</sup> Dans les tréfileries, on fabrique du fil métallique.

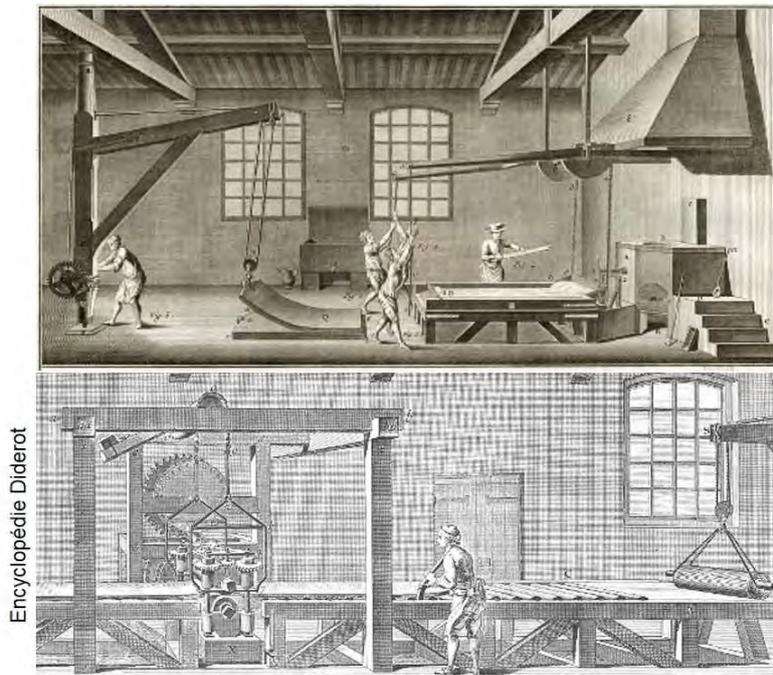


## fonderies de cuivre

*Martelage, aiguisage et fendage du cuivre, XVIII<sup>ème</sup> siècle.*

Les premiers **laminoirs** <sup>158</sup> datent de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, et permettaient de laminer le plomb. Mus hydrauliquement ou par des chevaux, ils étaient dotés d'un système permettant de régler facilement la distance entre les deux cylindres, et d'un ensemble d'engrenages permettant l'inversion du sens de rotation des cylindres, et donc de passer la plaque dans un sens, puis dans l'autre. A titre d'illustration, notons qu'afin d'abaisser l'épaisseur d'une plaque de plomb de 4 cm à 2 mm, il fallait faire passer la plaque environ 200 fois dans le laminoir (Diderot, 1751). Ce n'est qu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle que le laminage du fer et du cuivre fut entrepris.

<sup>158</sup> Un laminoir permet d'amincir de larges plaques de métal en fines feuilles, progressivement, par plusieurs passages entre des deux cylindres.



Encyclopédie Diderot

## laminoirs

*Laminage de plomb : table de coulée, engin de levage (haut) et laminoir (bas), XVIII<sup>ème</sup> siècle.*

Dans les **tréfileries**, le fil était passé à travers des orifices coniques de plus en plus petits afin de réduire progressivement son diamètre. Jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle, la traction du fil était réalisée en tirant manuellement sur ce dernier avec des tenailles, ou bien en tournant une bobine à l'aide d'une manivelle. Ensuite, la force hydraulique fut utilisée pour assister le tréfileur, le **tirant en arrière** pendant qu'il maintenait le fil avec des tenailles. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, il existait des **machines hydrauliques** dans lesquelles la préhension des fils à l'aide des tenailles et leur traction étaient entièrement automatisées.



Mendel Hausbuch, Germanisches National Museum

*Tréfileurs à différentes époques, Allemagne*

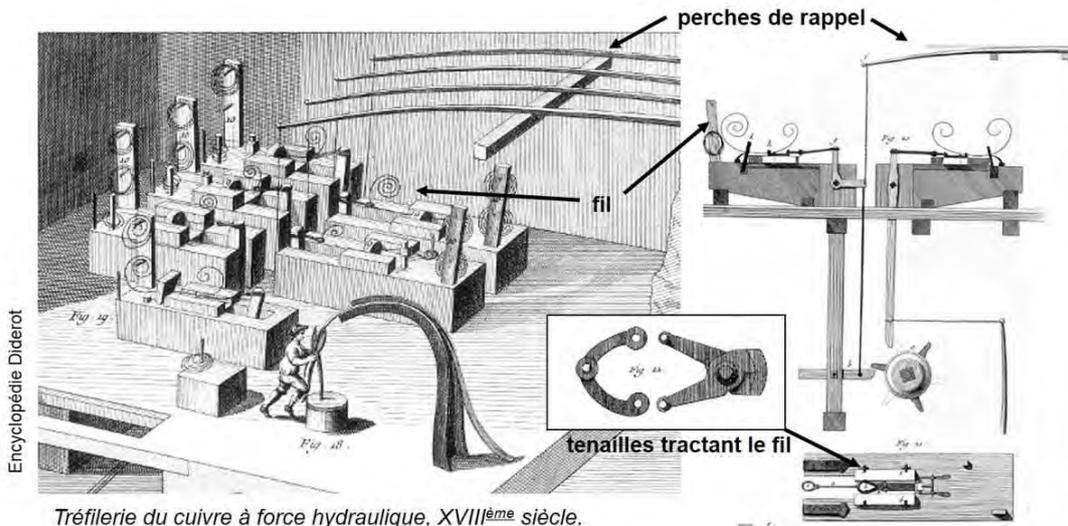
## tréfileries

De la pirotechnia,  
Vannoccio Biringuccio



Tréfilage à assistance hydraulique, Italie, XVI<sup>ème</sup> siècle.

## tirant en arrière



Tréfilerie du cuivre à force hydraulique, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

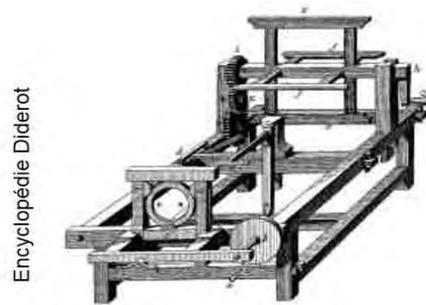
## machines hydrauliques

Le tournage et l'usinage du fer étaient plus difficiles que celui du bois. Ainsi, c'est au XVII<sup>ème</sup> siècle que les premiers tours et outils permettant de tarauder les vis en acier firent leur apparition. Cependant, ils nécessitaient un grand savoir-faire de l'ouvrier pour que le filetage réussisse. C'est à partir du milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle que furent fabriquées les premières machines permettant un véritable usinage du fer. Elles étaient entièrement en métal et possédaient des systèmes permettant de déplacer les outils de coupe, qui étaient devenus solidaires du tour. Ainsi, en une cinquantaine d'années furent développées en Angleterre et en France des machines permettant de **chariotter**<sup>159</sup> le fer, le raboter, l'aléser<sup>160</sup>, et de **tarauder les vis** avec des pas variables. L'existence de ces machines fut cruciale lors de la révolution industrielle lorsqu'il fallut usiner avec précision de **gros cylindres** de métal pour fabriquer les premières machines à vapeur. Enfin, les machines les plus minutieusement élaborées permettant de travailler le fer furent issues de la nécessité des **horlogers** de fabriquer des mécanismes complexes comportant des engrenages et vis de petite taille. C'est ainsi que, au cours du XVIII<sup>ème</sup> siècle, des machines

<sup>159</sup> Le chariotage du fer permet de fabriquer des cylindres en déplaçant l'outil de coupe le long d'une pièce de fer en rotation.

<sup>160</sup> L'alésage permet de former un creux cylindrique à l'intérieur d'une pièce. Par exemple, la fabrication d'un canon nécessite un alésage.

très ingénieuses, complexes, permettant de tailler les fusées<sup>161</sup>, diviser mécaniquement les limbes<sup>162</sup>, tailler les pignons des engrenages ou fileter des plateaux, furent réalisées.

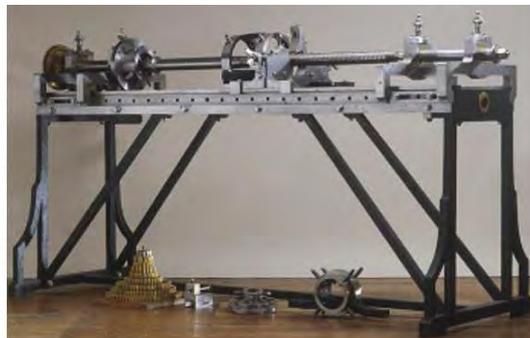


Encyclopédie Diderot

### charioter

*Tour à charioter le fer, 1751*

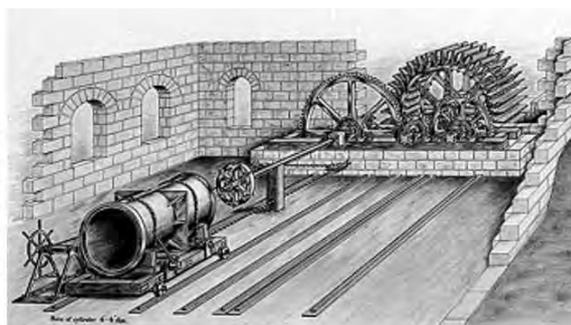
Musée des arts et métiers,  
Cnam / Photo Studio Cnam



### tarauter les vis

*Tour à tarauder les vis, 1795*

Science Museum / Science &  
Society Picture Library

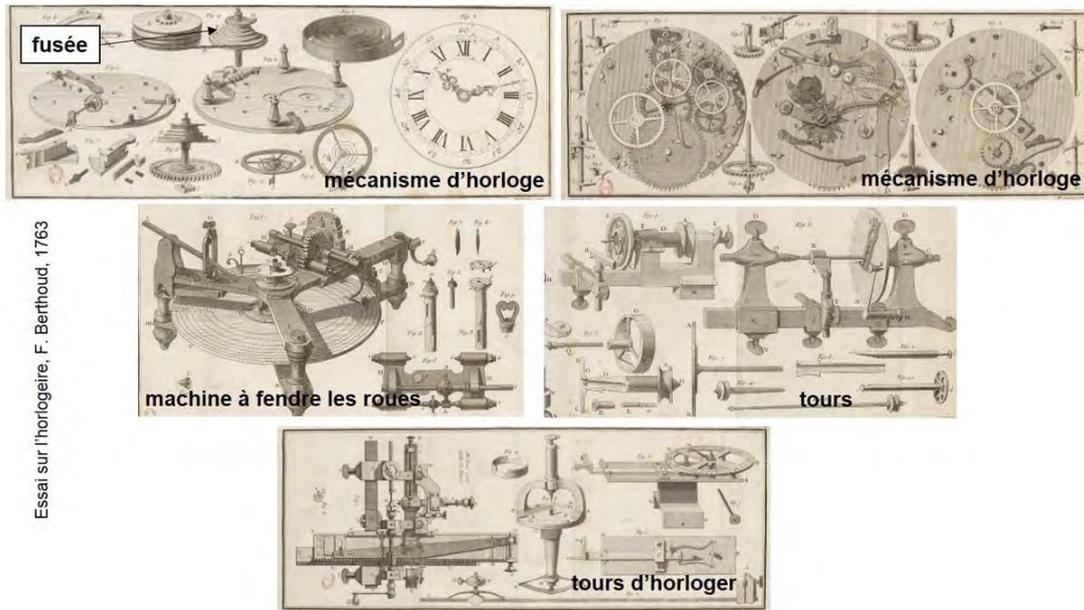


*Tour hydraulique à aléser les cylindres, 1769.*

### gros cylindres

<sup>161</sup> En horlogerie, une fusée est une pièce de forme conique autour de laquelle s'enroule une chaîne transmettant la force entre le ressort et le reste du mécanisme. Son rôle, très important, est de compenser le fait qu'un ressort qui vient d'être remonté exerce plus de force que lorsqu'il est presque déroulé. Lorsque le ressort exerce plus de force, la chaîne est enroulée autour d'une section étroite de la fusée, de telle sorte que le couple exercé sur elle reste à peu près constant.

<sup>162</sup> Le limbe est le bord gradué d'un cercle ou d'un arc de cercle.

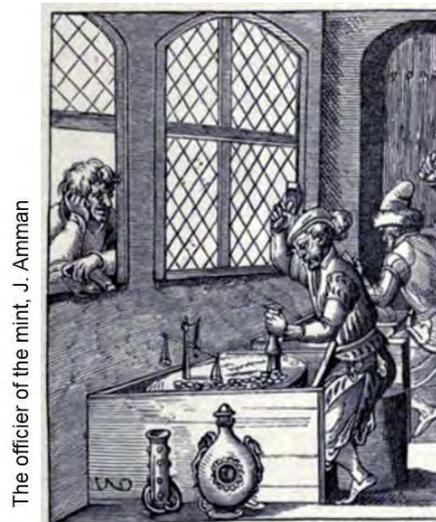


Essai sur l'horlogerie, F. Berthoud, 1763

## horlogers

*Mécanismes et outils d'horlogers, 1763.*

La fabrication d'un grand nombre de pièces de monnaie en série a également motivé le développement d'un outillage spécifique. Jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle, les pièces étaient **frappées** à chaud à l'aide d'un marteau et de coins<sup>163</sup>. Par la suite, l'invention du **balancier** permit l'impression à froid. Il s'agit d'une presse à vis dans lequel une forte pression peut être appliquée grâce à l'inertie donnée par de grosses boules fixées au bout de l'axe de la vis. Fixer un emporte-pièce au balancier permettait également la fabrication en série de petites pièces de métal : boutons, chaînes, etc.



## frappées

*Frappe de la monnaie, XVI<sup>ème</sup> siècle.*

<sup>163</sup> Les coins sont des pièces métalliques comportant l'empreinte de la monnaie. En frappant une pièce de métal placée entre deux coins, on imprime les deux faces de la pièce.



(gauche) Balancier à vis, 1699. (droite) Frappe au balancier, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

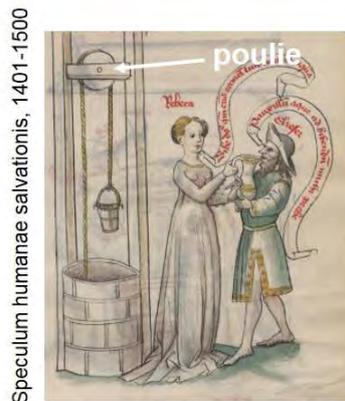
## balancier

### G. Eau, hygiène et confort

Les méthodes pour l'alimentation en eau dépendaient fortement de la localisation (campagne, ville, pays sec ou humide, proximité d'un fleuve ou non) (Roche, 1984). Les quatre principales sources d'eau utilisées étaient : la rivière ou le fleuve, le **puits**, la **fontaine** alimentée par un aqueduc, et la citerne collectant l'eau de pluie. Dans les puits, en dehors de la méthode consistant à jeter un seau au bout d'une corde et à le remonter à la main, le moyen d'élévation de l'eau le plus ancien semble être le **puits à balancier**, identique au *shadouf* égyptien, et permettant de remonter l'eau de nappes peu profondes (moins de 6 m). Sa forte emprise au sol le rendait par contre peu adapté au milieu urbain (Alexandre-Bidon, 1992). Dans les puits plus profonds, des poulies, des tambours<sup>164</sup>, puis des **manivelles** furent installés. On utilisait également la **force animale ou humaine** afin de mettre en rotation des **chaines à godets**, permettant de remonter de l'eau en continu. La densité de puits en milieu urbain était très importante. Par exemple, dans le Montpellier médiéval, ou à Paris en 1833, on estime qu'il y avait un puits pour deux maisons (Roche, 1984 ; Peyron, 1979). Les puits les plus profonds étaient ceux qu'on pouvait trouver dans les châteaux. Destinés à alimenter la population en eau propre en cas de siège, ils pouvaient dépasser la centaine de mètres. Progressivement, à partir du XIII<sup>ème</sup> siècle, l'alimentation en eau des villes par des aqueducs, qui avaient été laissés à l'abandon pendant la période précédente, conduisit à des travaux : des aqueducs furent restaurés ou construits, des conduites urbaines installées, permettant ainsi l'augmentation du nombre de fontaines (Gouédo-Thomas, 1992). A partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, dans les régions appropriées, des retenues d'eau en maçonnerie furent également construites en montagne, afin de réguler l'alimentation en eau. En milieu urbain, il était important d'élever l'eau des rivières, ce qui permettait d'alimenter des zones éloignées du fleuve. Pour cela, les différents systèmes, dont la mise en place débuta au XIII<sup>ème</sup> siècle, étaient les mêmes que ceux utilisés pour l'extraction de l'eau des mines : chaîne ou roue à godets, pompe aspirante et foulante, tympan, manège, roues

<sup>164</sup> Le tambour est un cylindre de bois autour duquel s'enroule la corde ou la chaîne.

hydrauliques, etc (Sowina, 1998). Par exemple, au XVII<sup>ème</sup> siècle, des **pompes hydrauliques** permettant d'élever de l'eau de plus de 20 mètres distribuait l'eau de la Seine à **Paris**. Egalement, un des ensembles de pompage les plus impressionnants de cette époque est la **machine de Marly**, alimentant Versailles en eau, et qui élevait l'eau de la Seine de 150 mètres en trois fois. Un des groupes de pompes était situé à plus d'1 km de la Seine et l'énergie nécessaire à leur fonctionnement était transmise par l'intermédiaire d'arbres de transmission en bois depuis les roues hydrauliques situées sur le fleuve, à l'image de ce qui était fait dans les complexes miniers de l'époque, et que nous avons déjà mentionnés plus haut.



*Puits à poulie, XV<sup>ème</sup> siècle*

## puits



*Fontaine, XV<sup>ème</sup> siècle*

## fontaine

Farms with Draw Well,  
Johannes van Doetechum, 1559



*Puits à balancier, Pays-bas, XVI<sup>ème</sup> siècle*

## puits à balancier

Les très riches heures du Duc de Berry



*Puits à manivelle, XV<sup>ème</sup> siècle.*

## manivelles

G. Pencz, Les sept planètes: Saturne, 1531

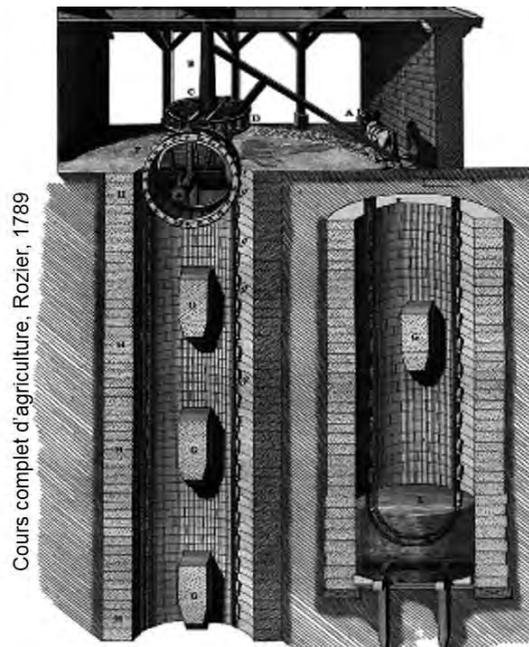


Wikimédia, Thomas Bresson



*(haut) Puits et cheval, XVI<sup>ème</sup> siècle. (bas) Puits de la citadelle de Besançon et son tympan, 117 m de profondeur, 1681.*

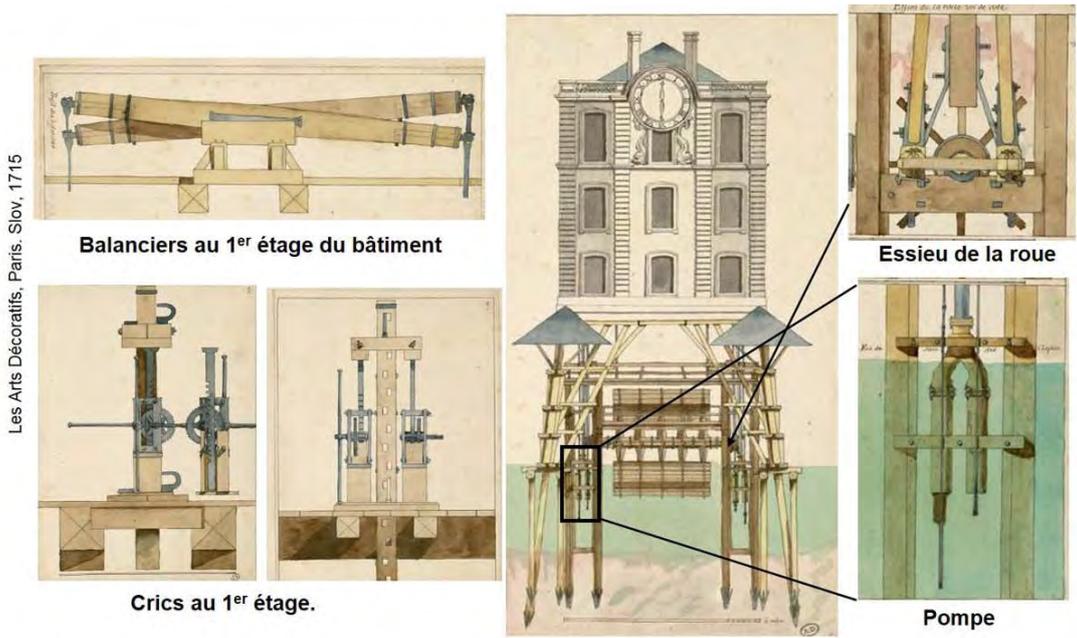
## force animale ou humaine



Cours complet d'agriculture, Rozier, 1789

Chapelet de godets en terre et cheval, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

**chaines à godets**



Les Arts Décoratifs, Paris, Slov, 1715

Balanciers au 1<sup>er</sup> étage du bâtiment  
Crics au 1<sup>er</sup> étage.

Essieu de la roue  
Pompe

Quelques éléments constitutifs de la Pompe de la Samaritaine, construite en 1602 et reconstruite en 1715.

**pompes hydrauliques**

Droits réservés



Le monde illustré n° 10, 1857



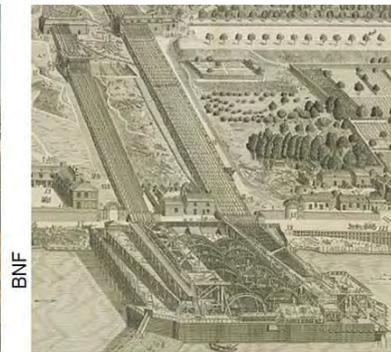
Raguenet, Musée Carnavalet, 1777



(gauche) Pompe de la Samaritaine, qui fut construite en 1602 et reconstruite en 1715. (droite) Pompe sur le pont Notre-Dame, construite en 1670 et détruite en 1857.

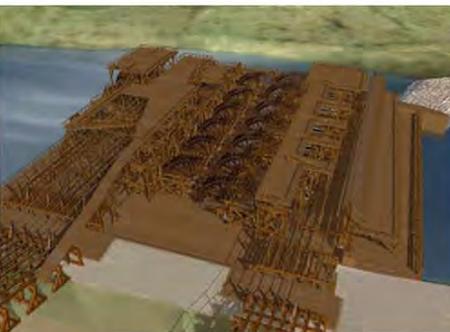
## Paris

P.-D. Martin, 1723

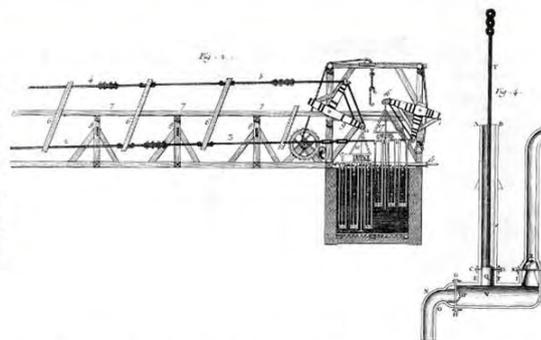


BNF

marlymachine.org



Encyclopédie Diderot



(en haut à gauche) Machine de Marly, 1723. (en haut à droite) Machine de Marly, 1682. (en bas à gauche) Reconstitution informatique de la machine de Marly. (en bas à droite) Schémas du système de transmission de l'énergie (haut) et de la pompe.

## machine de Marly

Pour la distribution de l'eau au sein des villes, les conduites les plus répandues dans les petites villes étaient celles en **bois**, basées sur le forage de troncs d'arbres et leur emmanchement (Genieys, 1829). L'étanchéité pouvait être assurée par différents types de mastic (graisse de mouton mélangée à de la brique pilée, ou huile de lin mélangée à de l'étoupe et de la chaux, par exemple). Pour une opération sous forte pression, l'étanchéité et la solidité étaient également assurées par des bagues en fer. Ces conduites finissaient par pourrir et devaient donc être remplacées régulièrement. Dans les villes plus importantes,

on pouvait également trouver des conduites en **terre cuite**, connues depuis l'Antiquité, mais qui présentaient l'inconvénient de la fragilité. Avec l'essor de la métallurgie, on se mit à utiliser des tuyaux en plomb, qui pouvaient être moulés pour les faibles diamètres, ou bien formés par l'enroulage de feuillets de plomb puis soudés à l'étain pour les diamètres plus importants. Leur coût était malgré tout très élevé. A partir de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, des tuyaux en **fonte**, coulés dans des moules, furent utilisés. Différentes techniques de jointage étaient disponibles et fonction des méthodes employées pour l'assemblage : rondelles de cuivre et de cuir, filasse goudronnée ou plomb fondu.

**bois**



R. C. Cracknell, Thames Water

Conduite d'eau en bois, Londres, XVI<sup>ème</sup>-XVIII<sup>ème</sup> siècle.

**terre cuite**



auction.catawiki.com

Conduite d'eau et dérivation en grès, Allemagne, XVI<sup>ème</sup>-XVII<sup>ème</sup> siècle.

**fonte**



Wikimedia commons, Moonik

Le Monde, Florence Evin

Conduites en fonte de la machine de Marly, Versailles 1682.

Les systèmes d'égouts romains furent complètement abandonnés au Moyen Âge, à part dans les abbayes. Certaines maisons comportaient une fosse d'aisance<sup>165</sup>, mais les déchets et excréments étaient la plupart du temps évacués dans la **rue**, parfois directement depuis des **latrines**. Entre le XIV<sup>ème</sup> et le XV<sup>ème</sup> siècle, de nombreuses villes entreprirent des travaux d'amélioration urbaine, notamment le pavage et la mise en place d'**égouts**. Ces derniers étaient souvent basés sur l'utilisation de ruisseaux traversant la ville, dans lesquels étaient versés les liquides rejetés par les maisons. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, on trouvait des fosses d'aisance dans de nombreuses maisons de villes, permettant de stocker temporairement les excréments.



**rue**

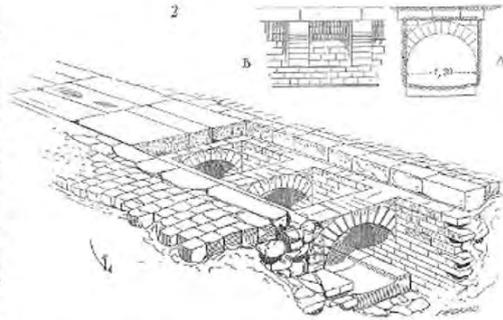
(gauche) Déversement des excréments dans la rue, Allemagne, 1489. (droite) Dame faisant ses besoins dans la rue, Paris, XVII<sup>ème</sup> siècle.



**latrines**

(gauche) Latrines, XV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Ville autrichienne, 1860.

<sup>165</sup> La fosse d'aisance est utilisée pour stocker les excréments.



## égouts

*Coupe d'un égout, Paris, XIII<sup>ème</sup> siècle.*

Nous allons maintenant présenter quelques données concernant l'éclairage (Figuier, 1870 ; Emptotz, 1991). Les méthodes pour s'éclairer au début du Moyen Âge étaient principalement la cheminée, les torches et les **lampes à huile**. Pour ces dernières, lors du pressage des huiles végétales, l'huile de plus basse qualité était mise de côté. Les **chandelles**<sup>166</sup> à proprement parler apparurent au XIII<sup>ème</sup> ou XIV<sup>ème</sup> siècle. Pour leur fabrication, on plongeait plusieurs fois de suite une mèche végétale dans le suif fondu. Elles dégageaient une odeur fort désagréable, en particulier si certains types de suifs (bouc, porc) étaient utilisés, et devaient être régulièrement mouchées<sup>167</sup>. L'utilisation de la cire d'abeilles pour fabriquer des cierges et des **bougies**<sup>166</sup> ne prit de l'ampleur qu'à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, et nécessitait plusieurs étapes destinées à blanchir la cire. Les bougies, plus lumineuses et dégageant une odeur agréable, restèrent un produit de luxe destiné à une riche clientèle. C'est au XVII<sup>ème</sup> siècle que les premières chandelles moulées apparurent et que l'utilisation de mèches de coton se fit plus courante. C'est également à cette époque que l'on commença à **éclairer les rues** de manière plus systématique avec des chandelles puis, plus tard, avec des lampes à huile. Par exemple, à Paris, la première installation d'un **réverbère** – lampe à huile surmontée d'un réflecteur métallique – eut lieu en 1769. A partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle, on commença également à utiliser l'huile de baleine dans les lampes à huile, et ce combustible devint celui utilisé principalement pour l'alimentation des éclairages de ville. Plusieurs évolutions notables des lampes à huile eurent lieu en quelques années à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Tout d'abord, l'utilisation du principe du vase de Mariotte<sup>168</sup> dans les lampes permit de maintenir un **niveau d'huile constant** au niveau de la mèche, évitant ainsi d'avoir à effectuer cette opération manuellement. Mais surtout, la mise au point du **bec d'Argan**, composé de mèches plates, concentriques et surmontées d'une cheminée de verre, permettait d'augmenter considérablement l'apport en oxygène lors de la combustion, conduisant à une flamme bien plus

<sup>166</sup> On utilise de mot « chandelle » lorsque du suif est utilisé, et le mot « bougie » lorsque de la cire d'abeilles ou de la cire stéarique est utilisée.

<sup>167</sup> Moucher une chandelle consiste à couper le bout déjà consommé de la mèche afin d'améliorer la luminosité.

<sup>168</sup> Ce principe, très simple à mettre en application, est utilisé dans les réservoirs d'eau pour les oiseaux, par exemple. Il permet d'avoir un réservoir de liquide situé en hauteur, maintenant en permanence un niveau de liquide constant dans un récipient auquel il est connecté, bien que la hauteur de liquide dans le réservoir soit supérieure à la hauteur du liquide dans le récipient.

lumineuse. La plupart des lampes apparues par la suite utilisèrent ce bec, y compris la lampe à pétrole, datant du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. On peut noter que, dès sa mise au point, le bec d'Argan fut également utilisé dans les phares. Jusqu'alors, la lumière était produite en utilisant différents combustibles, principalement du bois, mais également des graisses animales, de l'huile de poisson, du blanc de baleine<sup>169</sup>, des huiles végétales, ou du charbon. Ce dernier était le combustible préféré, car il donnait une flamme plus vive et plus visible, mais il était cher, et les quantités consommées très importantes (plusieurs centaines de kg par jour) (Fichou, 2002). Egalement, les **lentilles de Fresnel**<sup>170</sup>, qui furent installées dans certains phares à partir de 1823, permirent d'améliorer la luminosité en créant un faisceau de lumière parallèle. Enfin, au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, on mit en évidence que le suif est principalement composé d'acide oléique et stéarique<sup>171</sup> et on arriva à les séparer. Le premier acide est responsable de la mauvaise odeur et de la fumée des chandelles, qui sont ses principaux inconvénients. Le second est le composant des bougies stéariques, nos bougies actuelles, qui commencèrent à être fabriquées dans des manufactures dédiées à partir de 1834. Pour isoler l'acide stéarique du suif, ce dernier était **saponifié** par de la chaux à haute température, puis le savon obtenu décomposé par de l'acide sulfurique, dans des cuves garnies de plomb et chauffées par de la vapeur d'eau. Après refroidissement et moulage, des pains contenant encore les deux types d'acides étaient obtenus. L'acide oléique était extrait de ces pains en les **pressant** à froid, puis à chaud, dans des presses hydrauliques. Dans ces nouvelles bougies, la mèche en coton devait être traitée à l'acide borique afin de ne pas s'éteindre spontanément.



Lampes à huile: (gauche) Toulouse, X<sup>ème</sup> siècle. (milieu) Rennes, XII<sup>ème</sup> siècle. (droite) Picardie, XIV<sup>ème</sup> siècle.

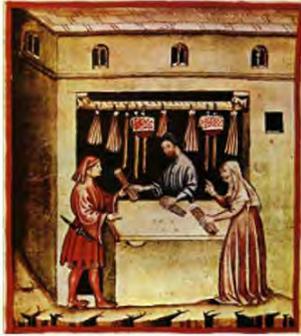
## lampes à huile

<sup>169</sup> Le blanc de baleine, appelé également spermaceti, est une graisse présente dans la tête de certains cétacés.

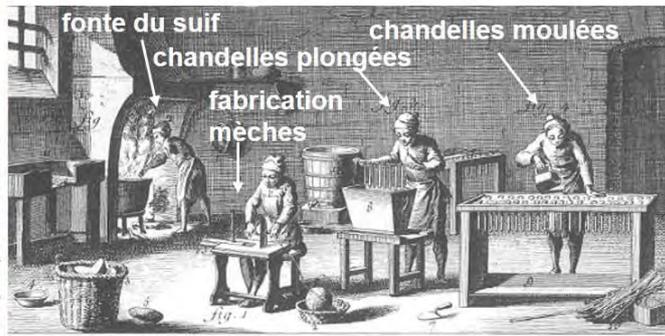
<sup>170</sup> Les lentilles de Fresnel sont des lentilles composées de cercles concentriques de faible épaisseur et ayant un profil judicieusement choisi. Elles ont le même effet optique que les lentilles standard, mais sont fines et légères.

<sup>171</sup> L'acide oléique est liquide et l'acide stéarique solide.

Tacuinum sanitatis



Encyclopédie Diderot



(gauche) Marchand de chandelles, XIV<sup>ème</sup> siècle. (droite) Fabrication de chandelles à partir de suif de mouton et vache, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### chandelles

Encyclopédie Diderot



Fabrication de bougies à la louche, XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### bougies

Les merveilles de la science, volume 4, Louis Figulier



comptoir-des-monnaies.com



### éclairer les rues

Eclairage public des rues de paris par des lanternes à chandelles, et médaille célébrant l'événement, 1668

Droits réservés, phozagora.free.fr

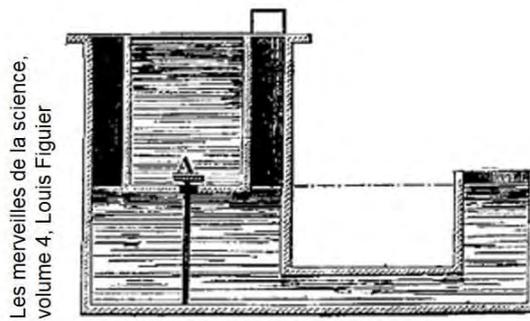


### réverbère

Premier « réverbère », 1769.



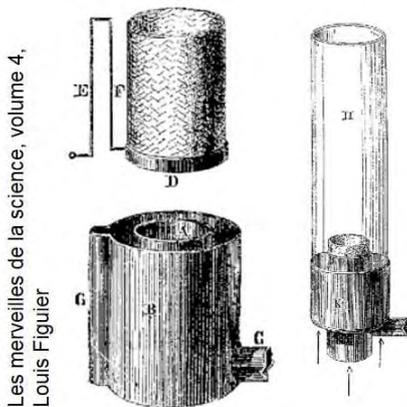
Collection Michel Laurens



Les merveilles de la science, volume 4, Louis Figuier

(gauche) Lampe à niveau constant orientale, période inconnue. (droite) Principe de la lampe à niveau constant et du réservoir à oiseaux.

## niveau d'huile constant



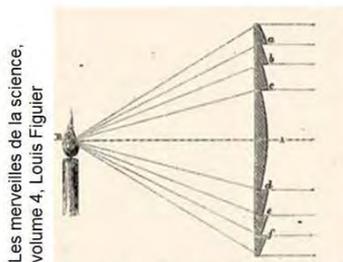
Les merveilles de la science, volume 4, Louis Figuier



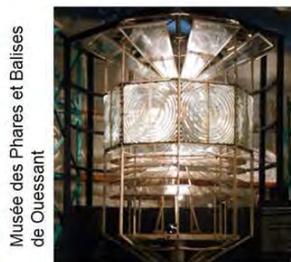
Collection Michel Laurens

(gauche) Bec d'Argan, 1783 : mèche cylindrique et cheminée droite. (droite) Lampe de cabinet, début XIX<sup>ème</sup> siècle, comprenant un réservoir à niveau constant, un bec d'Argan et une cheminée coudée.

## bec d'Argan



Les merveilles de la science, volume 4, Louis Figuier



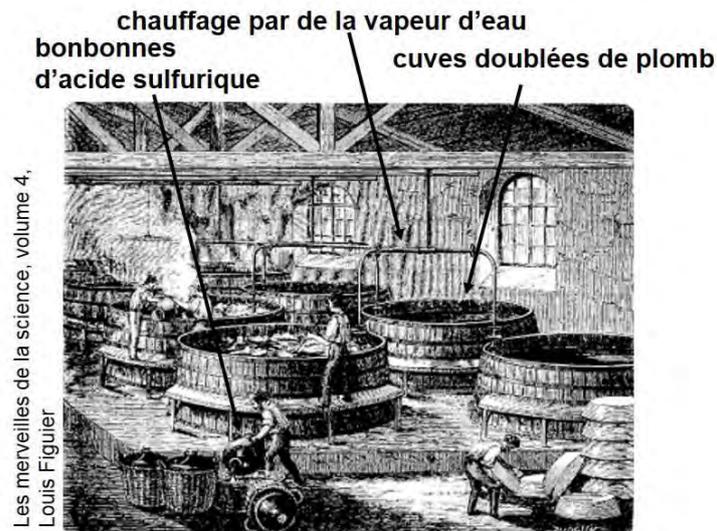
Musée des Phares et Balises de Ouessant



Ministère de la culture et de la communication & écologie

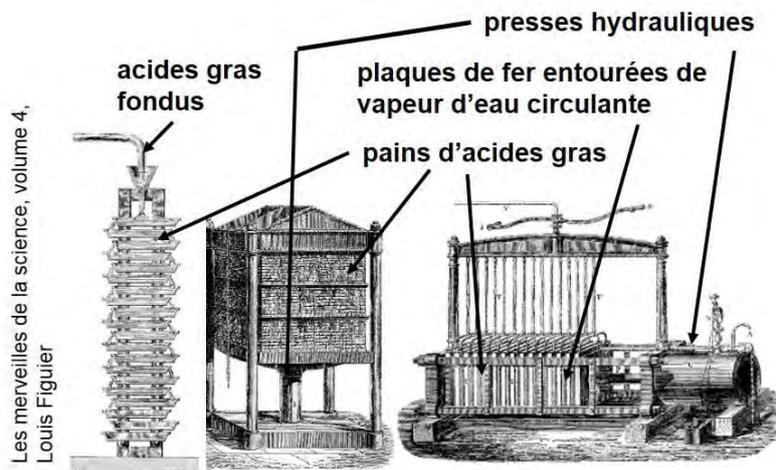
(gauche) Principe de la lentille de Fresnel. (milieu et droite) Première installation d'une lentille de Fresnel sur le phare de Cordouan, 1823. Le faisceau est rotatif, grâce à une horloge à poids. L'éclairage est réalisé par un bec d'Argan, avec 5 mèches concentriques.

## lentilles de Fresnel



**saponifié**

*Saponification du suif par de la chaux, environ 1840.*



**pressant**

*Moulage de pains d'acides gras, puis presse à froid, puis à chaud, environ 1840.*

Concernant le chauffage, on utilisait dans certaines régions, et parfois jusqu'à des périodes avancées, des **cheminées « chauffant au large »**, qui étaient situées au centre d'une pièce (Viollet-le-Duc, 1854). La fumée était évacuée par la porte, ou bien par un conduit situé au-dessus du foyer et guidant les fumées jusque dans les combles. De là, elles étaient évacuées par une ouverture latérale, ou par diffusion à travers les chaumes et les tuiles. On utilisait également des **braseros**, notamment dans les maisons à étage afin de ne pas enflammer le sol. A partir du XII<sup>ème</sup> siècle, les **cheminées adossées** aux murs, en maçonnerie, et conduisant les fumées à l'extérieur du toit apparurent ainsi que, à partir du XV<sup>ème</sup> siècle, les plaques en fonte.

Museo Arceologico de Cordoba



Tacuinum sanitatis, BNF



(gauche) Reconstitution d'une cheminée/cuisine centrale sans conduit, XII<sup>ème</sup> siècle.  
(droite) Cheminée chauffant au large, Allemagne, XV<sup>ème</sup> siècle.

### cheminées « chauffant au large »

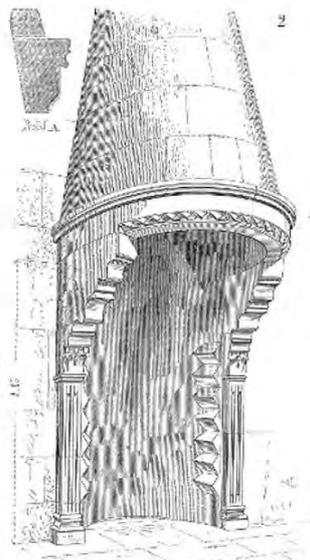
Musée du Noyonnais



### braseros

Brasero, France, XIV<sup>ème</sup> siècle.

Dictionnaire raisonné de l'architecture française, Viollet-le-Duc



### cheminées adossées

Cheminée adossée, France XII<sup>ème</sup> siècle.

## H. Transports et communications

Pendant toute la durée du Moyen Âge, une grande partie des produits consommés dans une région étaient produits localement, mais un certain nombre de produits devaient être importés de plus ou moins loin. Les besoins d'importation étaient plus importants dans les villes qui, en grossissant, ne pouvaient plus subvenir à leurs besoins en s'appuyant sur les zones à proximité immédiate. Parmi les produits transportés, le plus important d'entre eux est le sel, qui fit l'objet d'un commerce constant et conséquent tout au long du Moyen Âge. Viennent ensuite, suivant les époques et les régions, différents produits : vins, fromages, poissons et alevins, huile, céréales, légumes, épices, dattes, oranges, bois, charbon de bois, pierres, gypse, chaux, tuiles, soude, métaux, verre, étoffes fines, matières tinctoriales<sup>172</sup>, etc (Derville, 1976 ; André, 1923 ; Sadourny, 1976 ; Racine, 1976 ; Minovez, 1999 ; Figoli, 2009). Nous allons maintenant présenter les deux modes principaux de transport de ces marchandises : le transport terrestre et fluvial.

Les routes romaines, qui étaient encore en bon état à la fin de l'Empire romain, se dégradèrent rapidement, soit par manque d'entretien, soit parce qu'elles ne correspondaient plus aux usages. La qualité générale des routes et chemins était donc faible au début du Moyen Âge, et les traversées à travers champ courantes. Les possibilités de transport terrestre étaient assez réduites : à dos de mulets ou de chevaux pour les humains, et à l'aide de chars à bœufs – tout-terrain mais lents – pour les marchandises. L'augmentation des échanges commerciaux – en particulier à partir du X<sup>ème</sup> siècle –, et l'utilisation de **charrettes**<sup>173</sup> ou charriots<sup>174</sup> hippomobiles nécessitait un meilleur entretien des chemins, qui fut assuré par les villes à proximité de ces dernières, par les seigneurs, et par les riverains. Ces mesures conduisirent à la création d'un réseau de chemins de qualité médiocre dont l'entretien était financé par des impôts, des amendes, et de nombreux péages.



*Charrette, XV<sup>ème</sup> siècle.*

### **charrettes**

<sup>172</sup> Produits servant à tinter les étoffes.

<sup>173</sup> La charrette possède deux roues.

<sup>174</sup> Le charriot possède quatre roues.

A partir du XIV<sup>ème</sup> siècle, apparurent en Hongrie les premiers **coches**<sup>175</sup>, dans lesquels la caisse<sup>176</sup> est suspendue, afin de la désolidariser des essieux, ce qui amortit les vibrations de la route. Ces coches se répandirent rapidement dans toute l'Europe. Même si le mot « coche » se réfère au transport de voyageurs, le principe de la caisse suspendue était également utilisé pour le transport de marchandises, probablement parce que la suspension diminue les contraintes sur les essieux, et permet de transporter plus de marchandises sans casse<sup>177</sup>. Dans les premiers coches, une caisse légère était suspendue à l'aide de chaînes en fer, donnant lieu à un fort balancement des passagers, qui appelaient ces véhicules les « chars branlants ». Les mécanismes de suspensions évoluaient : on se mit à utiliser des **courroies de cuir** puis, à partir de 1666, des ressorts formés de lames métalliques (Terrier, 1986). Ce dernier système, coûteux et nécessitant un acier de grande qualité, était à cette époque uniquement réservé aux véhicules luxueux de la noblesse, des systèmes à base de courroies ou de bois étant utilisés dans les véhicules plus courants. Des systèmes de suspensions plus robustes furent également développés, permettant de construire des **carrosses**, complètement fermés, et donc dotés d'un toit et de portes. Concernant le châssis, la grosse poutre qui constituait l'armature centrale des coches et des carrosses fut remplacée dans les **berlines** (1660-1670) par deux brancards en bois reliant les roues, assurant plus de légèreté et une suspension additionnelle à ces véhicules. Les coches, berlines et carrosses eurent par la suite de nombreux descendants, destinés au transport de voyageurs ou de courrier postal, et dont on se bornera à citer les noms : chaises de postes, coucous, barouches, diligences, malles-poste, etc, se différenciaient par leur conception, leur vitesse maximale, l'attelage nécessaire pour les trainer, leur capacité, leur usage, et leur confort. Dans ces nouveaux véhicules, étaient intégrés des ressorts métalliques mieux conçus que les ressorts à lame originelle et également, dans les véhicules à quatre roues, des avant-trains mobiles<sup>178</sup>, qui amélioraient la maniabilité et diminuait l'usure des roues de l'avant-train.

---

<sup>175</sup> Les coches sont des voitures hippomobiles destinées au transport de voyageurs. Le mot provient du hongrois kocsi, qui signifie « provenant de Kocs », village hongrois qui a probablement produit les premiers véhicules à caisse suspendue.

<sup>176</sup> La caisse est la zone contenant les marchandises ou des passagers.

<sup>177</sup> Analyse personnelle.

<sup>178</sup> Le train-avant mobile s'oriente dans la direction suivie par le véhicule, évitant de devoir faire déraper les roues dans les virages.

Rudolf von Ems, WeltChronik,  
Zentralbibliothek Zürich, XIVe.



suspension  
métallique

Jeremias Schemel, 1668

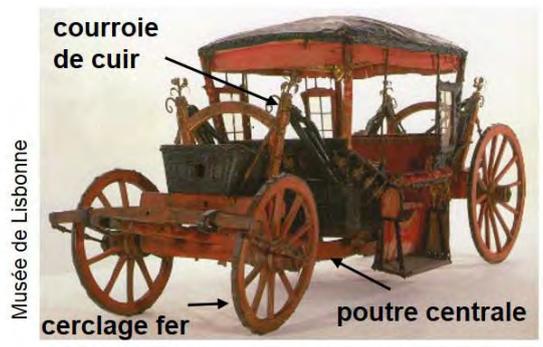


Droits réservés  
Attelage-patrimoine.com



Coche à caisse suspendue. (en haut à gauche) Autriche, XIV<sup>ème</sup> siècle. (en haut à droite) Hongrie, XV<sup>ème</sup> siècle. (bas) Deux charrettes à caisse suspendue, Allemagne, 1560.

**coches**



Musée de Lisbonne

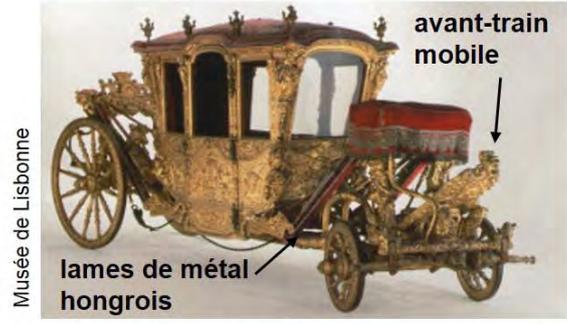
courroie  
de cuir

cerclage fer

poutre centrale

**courroies de cuir**

Coche royal, caisse suspendue, Espagne, 1619



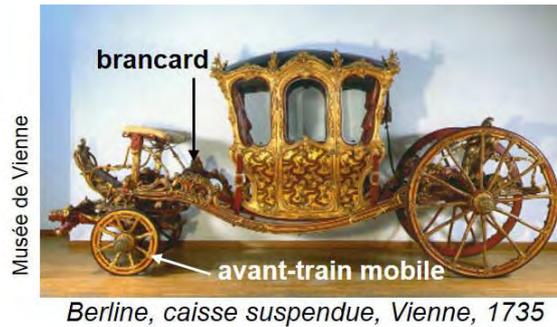
Musée de Lisbonne

lames de métal  
hongrois

avant-train  
mobile

**carrosses**

Carrosse de Marie-Anne d'Autriche, reine du Portugal, 1708



*Berline, caisse suspendue, Vienne, 1735*

## berlines

En parallèle, le pavage complet des axes principaux commença à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle et fut réalisé en environ deux siècles. La qualité des routes secondaires restait néanmoins extrêmement faible. Afin d'augmenter la vitesse de circulation des messages sur le territoire, des relais de postes permettant aux postiers de changer de cheval furent installés. Ainsi, en France, le premier système royal de poste fut mis en place à la fin du XV<sup>ème</sup> siècle, et fut rapidement rendu accessible aux voyageurs. Au sein des villes, après une première tentative rapidement abandonnée de ligne régulière de « bus » à Paris au XVII<sup>ème</sup> siècle, c'est à partir des années 1820 que les premières **coches publics** transportant des voyageurs sur des lignes régulières se développèrent.



« Carrosse à cinq sols », le premier bus, Paris, 1666

## bus



(gauche) Voiture publique parisienne, environ 1825. (droite) Omnibus parisien, 1828.



## coches publics

En dépit des améliorations notables dans le réseau routier et les véhicules, le transport terrestre resta tout au long du Moyen Âge, et jusqu'à l'avènement du chemin de fer, un moyen de transport plus cher que le transport fluvial (Minovez, 1999). Pour ce dernier, il existait un grand nombre de modèles d'embarcations, adaptées au fond d'eau disponible et à la possibilité ou non d'utiliser le vent pour remonter le cours de la rivière. Ils pouvaient transporter de quelques tonnes à plusieurs dizaines voire quelques centaines de tonnes de marchandises (Chapelot, 2004). On peut présenter deux grandes familles d'embarcation : celles qui étaient destinées à faire des allers-retours entre amont et aval (gabarres, **chaland**, ...), et celles qui n'effectuaient que la descente, étant démontées une fois arrivées et leur bois réutilisé (sapines, **courpets**, rembertes,...). Dans le premier cas, la remontée se faisait par halage – principalement humain – ou à la voile lorsque cela était possible.



Musée de la Batellerie, Port Sainte Foy

*Chaland, Dordogne, XVII<sup>ème</sup> siècle.*

## **chaland**

Musée de la Batellerie, Port Sainte Foy



*Courpet, Dordogne*

## **courpets**

L'un des problèmes principaux de l'aménagement des rivières pour la navigation était le conflit d'usage avec les moulins. En effet, ces derniers nécessitaient la présence de barrages permettant d'augmenter le niveau d'eau. Le passage des bateaux aux endroits où étaient construits des barrages se faisait par des **pertuis**<sup>179</sup>, dont le franchissement était dangereux et pénible pour les mariniers, et faisait perdre de l'eau aux meuniers (Musset, 1938). A partir du XIV<sup>ème</sup> et XV<sup>ème</sup> siècle, l'aménagement des fleuves et rivières pour les rendre navigables prit de l'ampleur. On se mit à construire des **chemins de halage** et des barrages en maçonnerie permettant de réguler le niveau d'eau, afin de rendre la rivière navigable toute l'année. On stabilisa les berges, supprima les rapides et les zones propices aux enlissements, et on installa des **d'écluses**, qui se répandirent largement à partir du XV<sup>ème</sup> siècle. Une des alternatives à l'aménagement des rivières est le creusement de canaux artificiels. Les premiers grands canaux furent construits au XIII<sup>ème</sup> siècle, et leur nombre alla grandissant avec l'importance prise par les échanges commerciaux. Un des aménagements les plus importants fut la construction du canal du midi, au XVII<sup>ème</sup> siècle, permettant de relier l'Océan Atlantique et la Méditerranée.



(gauche) Moulin et pertuis, Bretagne, 1543. (droite) Une technologie possible de pertuis.

## pertuis

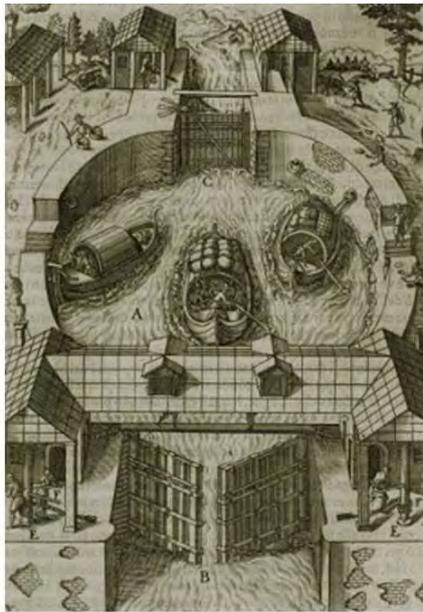


Wikimedia, Sylvain Crouzillat

Chemin de halage, Lot

## chemins de halage

<sup>179</sup> Un pertuis est une ouverture dans un barrage qui peut être fermée par différents systèmes mobiles. Lorsque le pertuis est ouvert, cela crée une petite chute d'eau, par lequel les bateaux peuvent passer en étant tractés (à contre-courant) ou retenus (dans le sens du courant).



## écluses

*Ecluse, Italie, 1607*

On peut également noter une technique particulière et intéressante ayant trait au transport du bois : le **flottage**. Il s'agit d'une technique extrêmement ancienne et utilisée auparavant pour des besoins ponctuels, mais qui se répandit à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, en raison de l'augmentation de la population des villes, qui ne pouvaient plus subvenir à leurs besoins dans les forêts environnantes, de l'augmentation de la consommation des industries – notamment les forges et de la marine –, et de la déforestation (Gilbert, 1933). Le principe général de cette technique est de mettre le bois à l'eau à proximité des zones de coupes et de le récupérer en aval. Dans les zones non navigables des rivières, le bois pouvait être transporté « à buches perdues »<sup>180</sup> mais, dans les zones navigables, des radeaux de buches de plusieurs dizaines de mètres de longs devaient être formés et accompagnés par des humains jusqu'à leur point de livraison, afin de ne pas percuter des embarcations (Buridant, 2006). Dans les zones aval, le niveau n'est pas en permanence suffisant pour transporter les buches, et on devrait profiter des crues des rivières ou des périodes de haute-eaux pour le transport. Néanmoins, dans certains cas, le niveau naturel ne permettait pas de transport, ou en tout cas pas suffisamment longtemps dans l'année. On générait alors un afflux temporaire d'eau par l'aménagement d'étangs, dont on lâchait les eaux, et également par l'ouverture de pertuis aménagés le long du fleuve. C'est par cette méthode que, pour alimenter **Paris** en buche à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, le bois était transporté depuis le Morvan, effectuant un trajet fluvial d'environ 300 km (Bravard, 1999 ; Poux, 2011).

<sup>180</sup> Dans ce cas, les buches sont simplement mises à l'eau et ne sont pas accompagnées le long de leur trajet, car elles ne risquent pas de percuter des embarcations.

Droits réservés



P. Berfin



Droits réservés

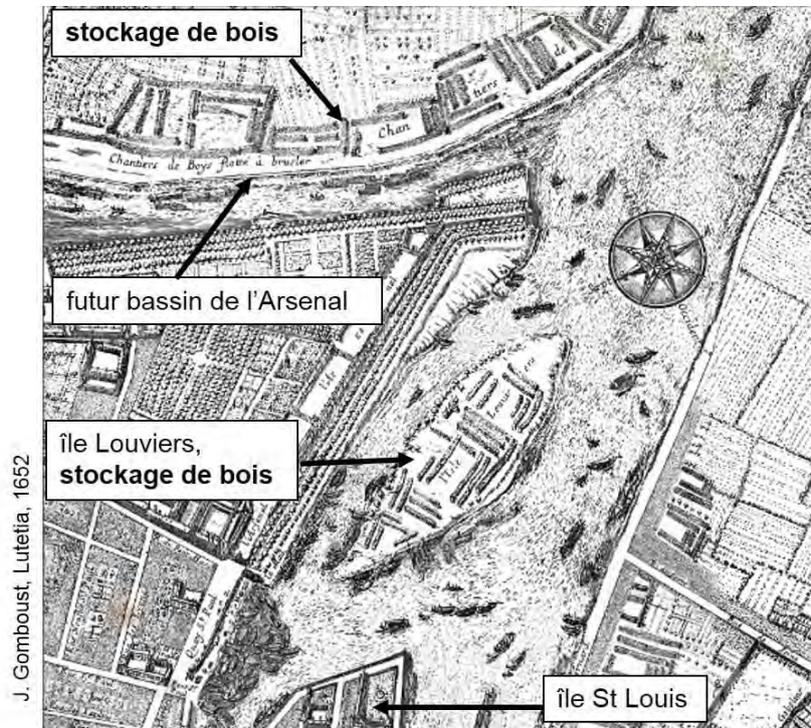


Encyclopédie méthodique, 1784



(en haut à gauche) Etang d'Yonne, dans le Morvan, construit pour permettre des lâchers d'eau entraînant les buches. (en haut à droite) Arrivée de buches à Clamecy, date inconnue. (en bas à gauche) Train de bois partant pour Paris, 1845. (en bas à droite) Train de bois à Paris, 1784.

## flottage



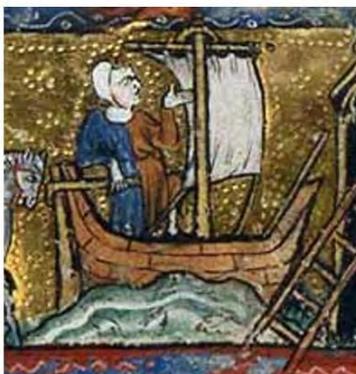
## Paris

Stockage du bois à Paris, 1652. L'île Louviers est désormais rattachée à la rive (devenue quai de l'Arsenal).

Concernant le transport maritime, les bateaux étaient, comme dans l'Antiquité, en bois, avec des voiles en coton ou en chanvre, puis en alfa à partir du XIV<sup>ème</sup> siècle. C'est au XI<sup>ème</sup> siècle qu'apparut le **gouvernail d'étambot**<sup>181</sup>, dont on ne sait s'il a diffusé depuis la Chine ou été découvert indépendamment à plusieurs endroits. Sa mise au point permit d'augmenter considérablement le tonnage des bateaux, qui était limité jusqu'alors par l'utilisation de rames-gouvernails difficiles à manœuvrer. Un premier changement important eut lieu au XV<sup>ème</sup> siècle concernant les voiles: c'est à cette époque que les voiles triangulaires, courantes autour de la Méditerranée, se propagèrent dans toute l'Europe. Les voiles carrées, utilisées jusqu'alors, rendaient la navigation par vent contraire particulièrement difficile et les trajets possibles tributaires des vents dominants. Ces voiles équipèrent les bateaux de l'époque, et notamment la célèbre **caravelle**, bateau maniable qui a été très utilisé pendant la période des grands voyages au XV<sup>ème</sup> siècle. L'importance de la marine crut très fortement à partir du XVI<sup>ème</sup> et XVII<sup>ème</sup> siècle en raison de l'exploration de l'Amérique, de l'ouverture de voies de commerce maritimes vers l'Inde, des nombreux conflits internationaux liés à la sécurisation des routes maritimes et à la défense ou l'attaque des nouvelles colonies, aux échanges avec ces dernières, à la traite des esclaves, etc. Ce fort accroissement du nombre de bateaux engendra des difficultés d'approvisionnement en bois à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle dans les pays côtiers (Espagne, France, Grande-Bretagne, Portugal et la Suède) (Schmithüsen, 2013).

## **gouvernail d'étambot**

Livre du trésor, et autres traités, BNF, 1326

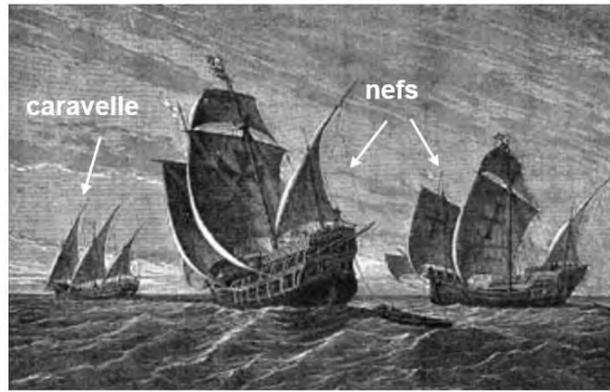


*Embarcation avec gouvernail d'étambot, XIV<sup>ème</sup> siècle*

---

<sup>181</sup> Ce gouvernail est fixé verticalement par des charnières sur l'étambot, qui est la pièce centrale à l'arrière du bateau.

Die Schiffe des Columbus, G. A. Closs, 1892



## caravelle

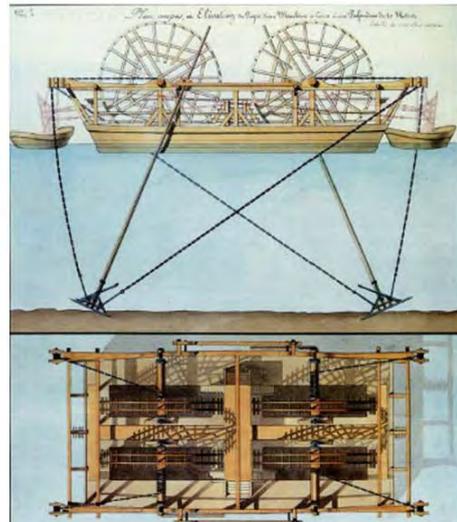
Les bateaux du voyage de Christophe Colomb, 1492

En ce qui concerne les ports, l'un des principaux problèmes techniques auquel on devait faire face est leur envasement constant, qui conduisait régulièrement à l'abandon pur et simple de certains. Le curage des ports se faisait avec des difficultés qu'on peine à imaginer maintenant (Schnepf, 1989 ; Manneville, 2004). Il s'effectuait au début du Moyen Âge par de simples pelles et des brouettes à marée basse. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, on fabriqua des **dragues à cuillères**, embarcations munies de grandes cuillères actionnées par des cages d'écureuil, permettant de racler le fond du port, et d'en remonter la vase. Enfin, on peut noter l'apparition au XVII<sup>ème</sup> siècle des **formes de radoub**<sup>182</sup>, qui doivent être asséchées. On utilisait pour cela des chaines à godets actionnées par des humains, par des manèges de chevaux ou plus rarement par la force de la marée (Forest de Bélidor, 1787).

«L'ingénieur artiste.» F. M. de Verges, 1819

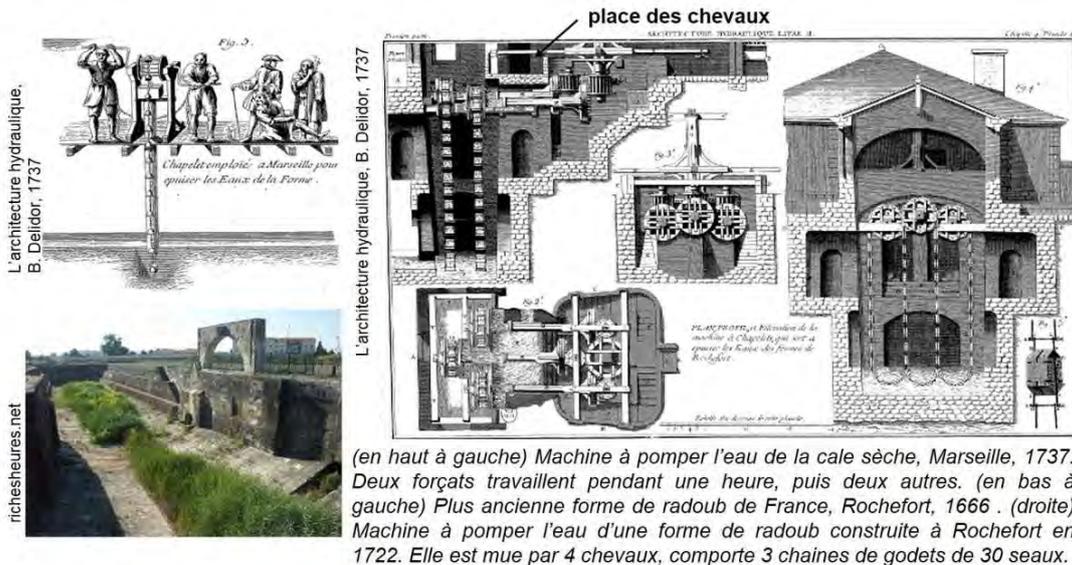


Machine à curer les ports, 1819.



## dragues à cuillères

<sup>182</sup> Les formes de radoub, appelées également cales sèches, sont les lieux où l'on met à sec les bateaux afin de les réparer.



## formes de radoub

### I. La médecine

Comme dans beaucoup d'autres domaines, l'entrée dans le Moyen Âge en Occident ne fut pas particulièrement favorable à la médecine, qui perdit en grande partie l'héritage grec. Néanmoins, les manuscrits grecs furent, dès le V<sup>ème</sup> siècle, traduits et disséminés dans les monastères, et les moines incités à soigner et à produire leurs propres médicaments (Fouassier, 1993). C'est ainsi que les monastères possédaient des **jardins médicinaux** et des dispensaires pour accueillir les malades. Cette médecine monastique était dominée par des aspects religieux ou magiques (prières, rituels, astrologie, ...) et par la phytothérapie. L'opposition de la religion à la science rendait toute évolution dans les traitements difficile. En parallèle, une médecine profane, moins répandue, existait toujours, comprenant guérisseuses et guérisseurs, barbiers-chirurgiens, et quelques médecins destinés aux puissants. La médecine monastique disparut progressivement à partir du XII<sup>ème</sup> siècle, en raison de l'interdiction faite aux prêtres par l'Eglise de pratiquer la médecine, et de l'apparition des premiers médecins issus des Universités, dont la création date du XI<sup>ème</sup> siècle.



Wikimedia, louboutinj



Frédéric Le Mouillour

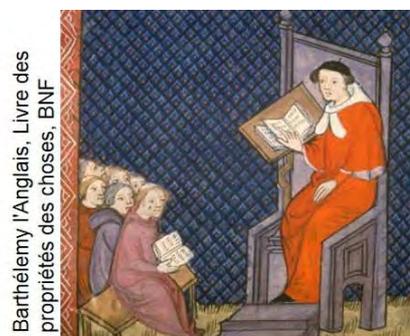


Robert Thom, 1929-1979

(gauche) Jardin de l'Abbaye de Daoulas, Bretagne: reconstitution des jardins médicinaux présents dans les monastères au Moyen-âge. (droite) Jardin médicinal.

## jardins médicinaux

La médecine laïque savante débuta à partir du X<sup>ème</sup> siècle lorsque les manuscrits arabes, et donc également des manuscrits grecs traduits en arabe, furent traduits et diffusés. Néanmoins, pendant plusieurs siècles, les ouvrages anciens ne furent pas remis en cause : dans les Universités, les **médecins** pratiquaient l'étude non critique des textes d'Hippocrate, Galien, Dioscoride, Rhazès, etc, au détriment de l'observation et de l'expérimentation. Prescrivant des ordonnances, délaissant la préparation des médicaments ou la chirurgie, les médecins universitaires étaient complétés de deux professions : les **apothicaires**, ancêtres des pharmaciens, préparaient des traitements à base de produits végétaux, minéraux et animaux, qu'ils soient locaux ou importés, et les **barbiers-chirurgiens**, souvent ambulants, pratiquaient les opérations courantes : sutures, percement d'abcès, ... Certains étaient spécialisés dans des opérations chirurgicales spécifiques : arrachage de dents, extraction des calculs de la vessie, ablation des hernies, opération de la cataracte, etc (Ameisen, 2011).



Barthélemy l'Anglais, Livre des propriétés des choses, BNF

Cours de médecine à l'Université, XIV<sup>ème</sup> siècle

## médecins

## apothicaires



Le régime du corps, XV<sup>ème</sup> siècle

Apothicaire, France, XV<sup>ème</sup> Siècle.

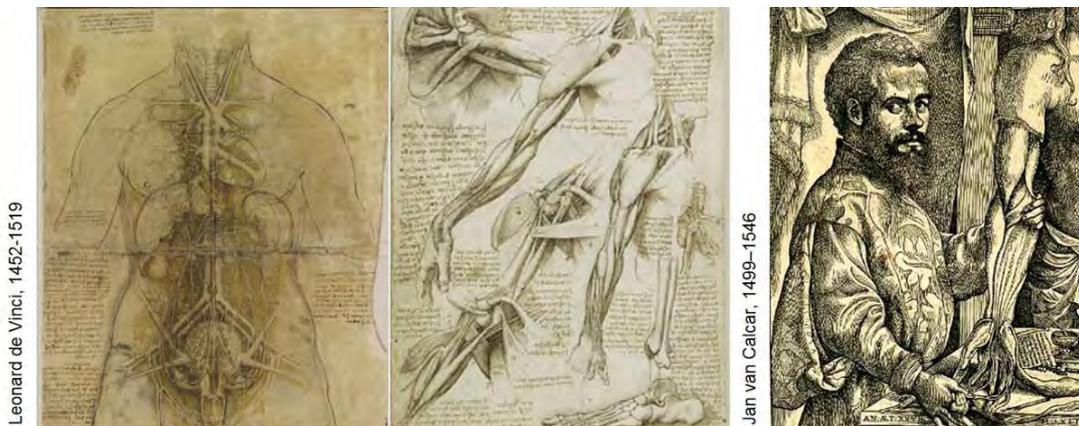


Medical and herbal collection, British Library, 1195

Opération d'hémorroïdes, de polypes du nez et de la cataracte, par des barbiers-chirurgiens, XII<sup>ème</sup> siècle.

## barbiers-chirurgiens

Ce n'est qu'à partir du XV<sup>ème</sup> siècle que la médecine évolua à nouveau, avec notamment la reprise des **dissections**, d'abord clandestinement puis, à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, devant les étudiants des Universités, permettant de mettre à jour les erreurs des textes anciens.



Leonard de Vinci, 1452-1519

Jan van Calcar, 1499-1546

(gauche et milieu) Dessins anatomiques, XV<sup>ème</sup> siècle. (droite) André Vésale, XVI<sup>ème</sup> siècle.

## dissections

A partir de cette période, et jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, des progrès eurent lieu dans différents domaines, que nous allons maintenant détailler : compréhension du fonctionnement du corps et – dans une moindre mesure – chirurgie, épidémiologie, et thérapeutique (Halioua, 2001).

Dans cette période, on comprit mieux la manière dont fonctionnait le corps: on mit à jour au XVII<sup>ème</sup> siècle le système exact de la circulation sanguine, et notamment son enrichissement en oxygène dans les poumons, le rôle des différentes glandes, des ovaires et des nerfs. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, on identifia les différents types de tissus, mit en évidence la nature électrique des signaux nerveux, comprit l'effet des différents sucs, et observa pour la première fois des cellules et des microbes. A l'exception des connaissances anatomiques, qui eurent quelques retombées positives en chirurgie, ces découvertes fondamentales eurent par contre peu de conséquences concrètes sur la prise en charge des malades et le traitement des maladies.

La chirurgie est restée jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle une discipline dévalorisée de la médecine. Malgré cela, à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, quelques avancées dans les opérations chirurgicales eurent lieu, en partie dues aux meilleures connaissances anatomiques. On se mit par exemple à ligaturer les artères lors d'amputations, évitant la cautérisation au fer rouge, cause de nombreux décès. On se mit également à amputer les membres gangrénés en coupant dans les tissus sains au lieu des tissus gangrénés. Les premières pinces destinées spécifiquement à extraire les balles des blessures datent également de cette époque. A partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle, la chirurgie devint une discipline à part entière de la médecine. A cette époque, les premières **paracentèses**<sup>183</sup> furent réalisées, ainsi que des **trépanations** en cas d'hématome dans la boîte crânienne, et l'on se mit à utiliser des garrots. Les techniques chirurgicales utilisées dans de nombreuses opérations courantes (calculs de la vessie, fractures, polypes, cataracte, etc) furent également améliorées, leurs protocoles détaillés dans des ouvrages, et la **palette d'instruments** utilisée par les chirurgiens étendue (scalpels, seringues, cautères, canules<sup>184</sup>, etc) (Scultet, 1712). Il ne faut néanmoins pas oublier que, en l'absence de techniques permettant de combattre les infections liées aux opérations chirurgicales, ces dernières restaient extrêmement risquées. Par ailleurs, la question de l'utilisation de l'**anesthésie** au Moyen Âge reste encore ouverte (Lagneau, 1885 ; Baur, 1927 ; Pioreschi, 2003). De nombreux écrits médiévaux rapportent l'usage de potions à base de plantes : opium, mandragore, jusquiame, ciguë ou cannabis (en Orient). En particulier, l'usage de la *spongia somnifera*, une éponge imbibée de plusieurs substances, dont de l'opium et de la mandragore, apparaît de manière récurrente. D'autres méthodes sont également mentionnées : hypnose, alcool, saignées, ou anémie du cerveau par compression des veines du cou. Néanmoins, les douleurs des malades durant les opérations sont également mentionnées ou imaginées. Il est

---

<sup>183</sup> La paracentèse consiste à inciser ou percer des parois d'une cavité afin de permettre l'écoulement d'un fluide accumulé.

<sup>184</sup> La canule est un cylindre creux permettant l'écoulement des fluides après une incision.

donc difficile de conclure sur l'efficacité et la diffusion de ces différentes techniques. En l'état actuel des connaissances, les vapeurs de la *spongia somnifera* ne semblent pas suffisantes pour avoir induit une vraie anesthésie, et l'opium ne peut pas induire un véritable état anesthésique sans mettre en danger le patient. On peut raisonnablement supposer que, en fait d'anesthésie, certains chirurgiens induisaient des états de somnolence ou d'anesthésie partielle en faisant ingérer au patient différentes substances (mandragore, opium, alcool, ...), et que le dosage délicat de ces méthodes risquant de plonger le patient dans le coma ait restreint leur diffusion.



L'arsenal de chirurgie de Jean Scultet, 1712

Paracentèse de l'abdomen, opération du calcul de la vessie, césarienne, 1712.

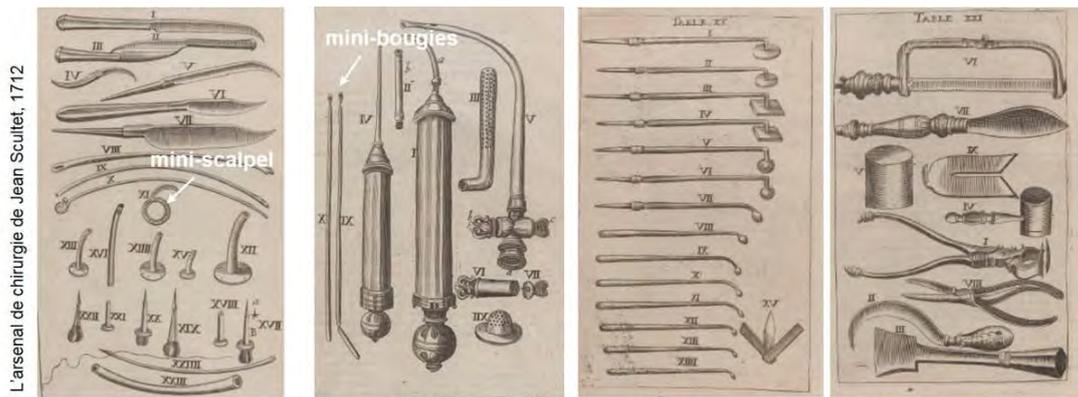
## paracentèses



L'arsenal de chirurgie de Jean Scultet, 1712

Opérations de la tête et trépanation, 1712

## trépanations



L'arsenal de chirurgie de Jean Scultet, 1712

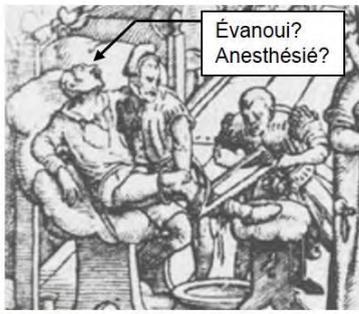
(gauche) Scalpels, canules, mini-scalpel pour ne pas effrayer les « femmes timides et les enfants », mini-bougie à introduire dans l'urètre, seringues, 1712. (milieu) Outils à cautériser, 1712. (droite) Instruments pour les amputations, 1712.

**palette d'instruments**

Cathédrale d'Orvieto, Loenzo Maitani, photo par Renaud Camus



Opus Chirurgicum, Paracelse, 1565



(gauche) Dieu hypnotisant Adam avant de lui ôter une côte ?, Italie, 1330. (droite) Amputation, XVI<sup>ème</sup> Siècle.

**anesthésie**

Post Mundi Fabricam, XIVe siècle



**spongia somnifera**

Spongia somnifera, XVI<sup>ème</sup> Siècle.

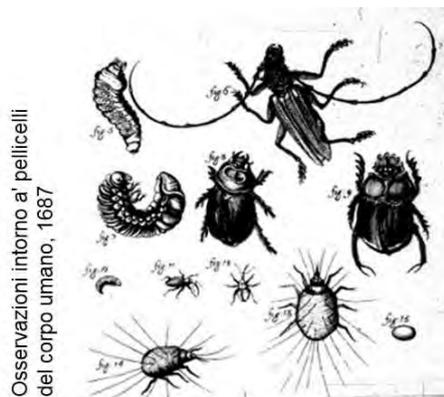
En matière d'épidémiologie, c'est la meilleure compréhension de l'origine de la transmission des maladies qui permet quelques avancées. On savait depuis longtemps que la lèpre ou la peste étaient contagieuses, même si on ne connaissait pas l'origine du facteur responsable de la transmission. C'est ainsi que des léproseries furent mises en place au XI<sup>ème</sup> siècle, et qu'on imposa des quarantaines lors des épidémies de pestes à partir du XIV<sup>ème</sup> siècle, mais c'est à partir du XVII<sup>ème</sup> siècle que, grâce aux **microscopes** et aux observations épidémiologiques, on commença à mieux comprendre l'origine de certaines

maladies et leur modes de transmission: **acariens** pour la galle, contamination par l'eau souillée pour le choléra, champignons pour les mycoses, rapport sexuels pour la syphilis, etc. Ceci permit d'envisager des mesures plus efficaces contre certaines maladies (**préservatifs** contre la syphilis, par exemple). Les premières variolisations<sup>185</sup> eurent lieu en Europe au XVIII<sup>ème</sup> siècle, suivant une méthode utilisée en Orient (Gofstein, 2007). Elle restait néanmoins dangereuse, avec un taux de mortalité de 2% à ses débuts. C'est à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle que l'on s'aperçut qu'en inoculant les germes de la **vaccine** – une maladie proche de la vérole contractée par les vaches – à des patients, ils n'attrapaient pas la vérole. Il s'agissait donc de la première **vaccination**, et elle se généralisa très rapidement après sa découverte. Les vaccins suivants attendirent presque un siècle et les travaux de Pasteur avant d'être mis au point.



Anton van Leeuwenhoek, son microscope (1670), et ses observations : globules rouges, microbes, spermatozoïdes, ...

## microscopes



## acariens

Première observation des acariens à l'origine de la galle, Italie, 1687.

<sup>185</sup> La variolisation consiste à inoculer par scarification du liquide issu de pustules varioliques de malades à des enfants, les empêchant ainsi de tomber malade plus tard.

## préservatifs

droits réservés



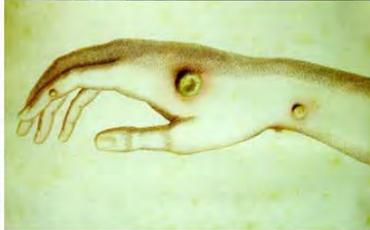
*Préservatif, Suède, 1640*

## vaccine

wikimedia commons



Hand of Sarah Nelmes,  
W. Skelton, 1798



*Pustules de la vaccine (vérole de la vache), dont le contenu est utilisé pour vacciner contre la vérole.*

## vaccination

Ernest Board, 1877-1934



*Dr Jenner réalisant son premier vaccin, 1796.*

En matière de thérapeutique, la pharmacopée moyenâgeuse resta jusqu'au XV<sup>ème</sup> siècle essentiellement basée sur l'usage de plantes, qui provenaient de l'héritage grec, gallo-romain, celte et, lorsque les manuscrits furent traduits, de la pharmacopée musulmane. Progressivement, la distribution des médicaments fut règlementée, devenant l'apanage des apothicaires. Ces derniers étaient ainsi les seuls à avoir le droit de fabriquer la **thériaque**, « la reine des médecines »,

particulièrement réputée, et qui fut particulièrement recherchée pendant les grandes épidémies, en dépit de son inefficacité dans ce contexte. Afin d'éviter les contrefaçons, la thériaque était préparée publiquement sous l'œil d'observateurs, une pratique qui s'est perpétuée jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle (Parojcic, 2003). La thériaque diatesseron, plus simple et moins chère, ne comportait que quatre éléments : racines de gentiane, racines d'aristoloche<sup>186</sup>, baies de laurier et myrrhe<sup>187</sup>, quatre éléments aux effets pharmacologiques indéniables, mais ne pouvant évidemment pas soigner toutes les maladies (Flahaut, 1998). La pharmacopée s'enrichit progressivement de nouvelles plantes. C'est ainsi que le **quinquina**, efficace contre les fièvres en général et le paludisme en particulier, fut importé du Pérou en Europe au XVII<sup>ème</sup> siècle. Egalement, la digitale pourpre se mit à être utilisée pour le traitement de certains œdèmes, et la colchique pour celui de la goutte (XVIII<sup>ème</sup> siècle).



Tacuinum sanitatis. XIVe siècle

## thériaque

*Apothicaire délivrant la thériaque, XIV<sup>ème</sup> Siècle.*



wiki commons, H. Zell

## quinquina

*Ecorce de quinquina, contenant de la quinine, anti-paludéen.*

<sup>186</sup> L'aristoloche est une plante grimpante, toxique, dont l'étymologie signifie « accouchement facile ».

<sup>187</sup> La myrrhe est une résine durcie obtenue par incision d'un arbre poussant dans le nord-est de l'Afrique et dans la péninsule arabique.

Cependant, en parallèle de ces lentes évolutions, qui poursuivaient une voie empruntée par la médecine depuis des millénaires, le XVI<sup>ème</sup> siècle vit le retour des alchimistes dans le domaine de la médecine, notamment par la voix de Paracelse, alchimiste et médecin, qui promulguait l'usage des métaux et produits chimiques en médecine. Il défendait également la vision selon laquelle un composé actif contenu dans une plante doit en être extrait et utilisé pour une maladie spécifique. Il s'opposait en cela à l'utilisation de thériaque et à d'autres mélanges de plantes. L'usage de produits issus de la chimie fit l'objet d'une querelle importante, qui se focalisa sur l'autorisation de prescrire des ingestions d'antimoine, médicament miraculeux pour les uns, poison dangereux pour les autres (Mascherpa, 1982). Cette querelle dura un siècle et s'acheva en 1666 par l'autorisation d'utilisation de l'antimoine, qui fut largement utilisé par la suite pour soigner toutes sortes d'affections, même si son efficacité dans la plupart d'entre elles reste discutable. De même, le mercure fut très utilisé pour traiter la syphilis à partir de la fin du XV<sup>ème</sup> siècle et jusqu'à la fin XIX<sup>ème</sup> siècle, en dépit de son inefficacité et de sa forte toxicité (Tilles, 1996). Néanmoins, certains produits chimiques furent utilisés à bon escient, comme par exemple le nitrate d'argent pour ses propriétés antiseptiques.

Le XIX<sup>ème</sup> siècle fut une période particulièrement féconde pour la médecine, puisque des avancées conséquentes eurent lieu dans le domaine de la chirurgie, de la thérapeutique, et de la prévention. En matière de chirurgie, le développement de l'antisepsie, de l'asepsie<sup>188</sup> et de l'anesthésie permit de réaliser des interventions chirurgicales moins risquées, plus longues, et moins douloureuses pour les patients. Pour assurer les conditions d'asepsie, on se lavait les mains au chlorate de chaux, le phénol étant utilisé en tant qu'antiseptique. Quant aux opérations sous anesthésie, elles furent réalisées en utilisant de l'**éther**, du chloroforme, ou du protoxyde d'azote au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. En matière de thérapeutique, l'extraction des principes actifs à partir de plantes connus pour leurs effets pharmacologiques permit de produire **morphine**, quinine, colchicine, aspirine<sup>189</sup>, cocaïne et émétine<sup>190</sup>. Enfin, c'est à partir de la fin de ce siècle que commença le véritable développement des vaccins.

---

<sup>188</sup> L'asepsie consiste à éviter l'introduction de microbes dans l'organisme lors d'opérations.

<sup>189</sup> Plus exactement, deux substances voisines efficaces contre la fièvre, la salicyline et l'acide salicylique, furent extraites du saule blanc et de la reine-des-prés. L'aspirine fut le nom commercial donné plus tard à un dérivé de l'acide salicylique.

<sup>190</sup> L'émétine est un puissant vomitif extraite d'un arbre, l'épica.

Paul Getty Museum



Wood Library/Museum,  
Park Ridge



*Première anesthésie à l'éther et réplique de l'inhalateur utilisé, Boston, 1846.*

## éther

Robert Thom



## morphine

*Sertürner, un jeune pharmacien allemand, isole la morphine et la teste sur lui-même et trois amis, 1816.*

## **CHAPITRE III : LA REVOLUTION INDUSTRIELLE**

Les prémices de la révolution industrielle ont eu lieu en Angleterre au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, et l'on peut considérer que la transformation complète du système de production industrielle fut achevée dans ce pays au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle (Rioux, 1971 ; Lévy-Leboyer, 1996 ; Asselain, 2017 ; Wrigley, 2010 ; Verley, 1991). Cette révolution n'a été rendue techniquement possible que par deux événements arrivant avec seulement quelques années d'écart en Angleterre : la première production de fonte à base de coke en 1709, et la première installation de machine à vapeur en 1712. Néanmoins, un très grand nombre d'autres facteurs secondaires peuvent potentiellement avoir participé à cette révolution, sans qu'il soit aisé de déterminer s'il s'agit de causes ou de conséquences. Ce point fait l'objet de recherches spécifiques par les historiens, qui cherchent à comprendre pourquoi la révolution industrielle a eu lieu en Angleterre (et pas ailleurs) au XVIII<sup>ème</sup> siècle (et pas avant ni après). Voici les facteurs principaux qui font l'objet de discussions et qui, causes ou conséquences, font partie du paysage de cette Angleterre en pleine mutation : une croissance urbaine extrêmement forte; un système agricole ayant une organisation plus «capitaliste» que familiale, permettant le développement de parcelles agricoles de grandes tailles employant un nombre réduit de travailleurs; l'accumulation de capital et un système bancaire organisé, rendant possibles les forts investissements nécessaires à la mutation; la spécialisation croissante du travail (y compris agricole); l'augmentation notable du temps de travail, avec par exemple l'emploi d'enfants dans les manufactures; l'exploitation des colonies; la forte augmentation de l'offre et la demande en produits manufacturés à usage familial ; l'amélioration de la qualité des routes qui, en Angleterre, passa par le développement de nombreuses routes à péages ; l'utilisation croissante du charbon pour de nombreux usages nécessitant de l'énergie thermique, et pour lesquels le bois était auparavant utilisé. Nous ne détaillerons pas ces différents points dans ce livre, ni les aspects idéologiques et politiques derrière cette révolution. Nous nous contenterons de présenter les deux techniques sine qua non de la révolution industrielle telle qu'elle s'est historiquement déroulée – la métallurgie au coke et la machine à vapeur – ainsi que les rétroactions directes et indirectes qu'elles ont générées. Le Chapitre IV sera l'occasion de constater que, parmi ces deux ingrédients, la métallurgie au coke est résolument indispensable à une production industrielle de masse et est, d'une certaine manière, plus “fondamental” que la machine à vapeur.

## A. Le coke et la sidérurgie.

L'Angleterre, dès le milieu du XVI<sup>ème</sup> siècle, souffre d'une pénurie de bois, d'autant plus grave que le bois est toujours nécessaire à la construction de sa flotte maritime, un enjeu stratégique important à cette époque (Nef, 1977). L'utilisation du charbon augmente de manière significative à partir de cette période. Si le charbon, en dépit de sa mauvaise odeur, peut être facilement utilisé pour du chauffage domestique, son utilisation pour des applications industrielles est plus problématique : les vapeurs soufrées du charbon de bois polluent la plupart des matériaux et nécessitent des adaptations des procédés industriels afin d'utiliser la chaleur issue de la combustion du charbon tout en évitant les inconvénients de ses fumées.

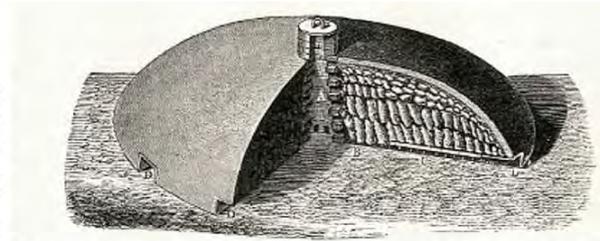
La plupart des inconvénients du charbon peuvent être contournés par l'utilisation du **coke**, dont l'utilisation démarra timidement vers la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle en Angleterre. Le coke est de la houille qui a subi un traitement similaire à celui du bois quand on cherche à le transformer en charbon de bois, c'est-à-dire une combustion partielle. Dans les premiers temps, il fut obtenu par la méthode ancestrale de fabrication du charbon de bois, la **meule** (Ledebur, 1895 ; Jordan, 1875). Au début de l'utilisation du coke, au cours du XVII<sup>ème</sup> siècle, divers procédés furent progressivement adaptés au coke : la production du malt pour la bière (donnant lieu à la fameuse *pale ale*), la transformation de fonte en acier, la cuisson des briques ou la fusion du cuivre, du plomb et de l'étain, par exemple. Néanmoins, il resta pendant un siècle un procédé inaccessible au coke : la réduction du minerai de fer pour former de la fonte ou du fer.



Wikimeida, Stahlkocher

**coke**

*Blocs de coke*



Fabrication du coke dans une meule (2m de haut,  
10-30 tonnes de houille)

## meule

La première fabrication réussie de fonte à partir du coke date de 1709, mais sa qualité n'était pas équivalente à celle obtenue grâce au charbon de bois, et ne permettait de fabriquer que des objets de faible épaisseur, comme des **marmites** (Jacominy, 2017). En 1750, le procédé devint suffisamment au point pour permettre l'obtention d'une fonte de qualité équivalente à celle obtenue avec du charbon de bois. C'est ainsi que fut par exemple construit le premier **pont métallique** en fonte en 1779 en Angleterre. Le procédé diffusa dans toute l'Angleterre, puis progressivement en Europe; ainsi, en France, la première coulée de fonte issue du coke eut lieu en 1785. L'augmentation de la consommation de coke conduisit à une évolution des fours utilisés pour le produire (Ledebur, 1895 ; Jordan, 1875). Les plus simples étaient des **fours ouverts** en maçonnerie, comprenant quelques ouvertures latérales. La plupart des autres étaient des fours fermés, dans lesquels la combustion est mieux contrôlée, et le rendement plus important. Parmi eux, on trouve les « **fours de boulanger** », appelés ainsi de par leur similitude avec ce dernier, qui se chargeait et déchargeait par une porte latérale, et dans lesquels les gaz issus de la combustion de la houille étaient évacués par le sommet du four. Ils pouvaient contenir entre 3 et 10 tonnes de houille. On trouvait également des fours assez similaires, nommés « **beehives ovens** » en Angleterre (ou plus tard aux Etats-Unis), qui étaient assemblés dos-à-dos en longues rangées. Dans certains d'entre eux, les gaz issus de chaque four circulaient dans un conduit central entre les fours, permettant à la fois de contribuer à la montée en température des fours, d'évacuer les fumées issues de la combustion par une haute cheminée commune, et éventuellement d'utiliser la chaleur produite pour d'autres usages. Après le développement du chemin de fer, on se mit à charger ces fours par leur sommet depuis des wagonnets, qui permettaient de verser directement la houille dans le four. En 1854, des **fours « Appolt »** furent conçus, dans lesquels la houille était entièrement chauffée depuis l'extérieur du four par ses propres gaz, qui étaient enflammés par un apport d'oxygène ayant lieu en dehors du four, et non plus à l'intérieur de celui-ci, comme dans les modèles précédemment décrits. Enfin, à partir de 1867, furent conçus des **fours à récupération des sous-produits**, dans lesquels les gaz issus de la houille étaient en partie condensés pour récupérer goudrons et ammoniac, et la partie non condensée utilisée pour le chauffage du four.

## marmites

Ironbridge Gorge Museum Trust



*Premiers objets en fonte au coke, 1714*

## pont métallique

Coalbrookdale by Night, Coalbrookdale by Night, 1801



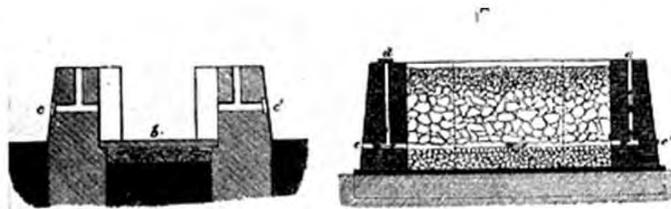
Wikimedia



*(gauche) Coalbrookdale en 1801, village où furent installés les premiers haut-fourneaux au coke, et où furent coulées les pièces du « Iron bridge ». (droite) Premier pont métallique (fonte), « Iron Bridge », Angleterre, 1779.*

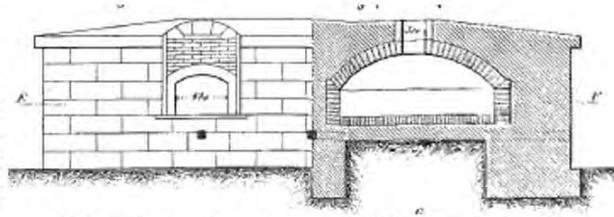
## fours ouverts

The History of Coke Making and of The Coke Oven Managers, R.A. Mott, 1836



*Fours ouverts de type « Schaumburg », Allemagne, 1800.*

Album de m métallurgie,  
S. Jordan, 1875



« Four de boulanger », 3-10 tonnes de houille

## fours de boulanger

The boys book of industrial  
information, Londres, 1858



newcastlegateshead.com



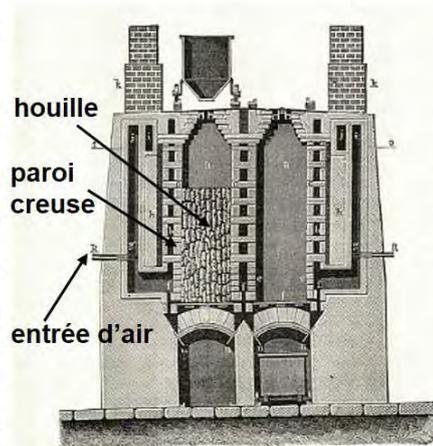
Wikimedia, plazac



(en haut à gauche) Les 18 fours à coke du terminal ferroviaire de Londres (Camden Goods Depots), 1839. (en haut à droite) Whinfield Coke Ovens, Angleterre, 1861-1958. (bas) Fours à coke désaffectés, Colorado.

## beehives ovens

Manuel de la métallurgie du Fer, A. Ledebur, 1895

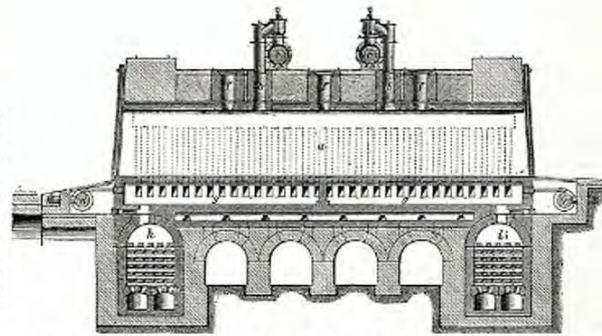


Fonds Académie François bourdon



(gauche) Four Appolt avec chauffage par les parois (1854). (droite) Batteries de fours Appolt, Le Creusot, 1862.

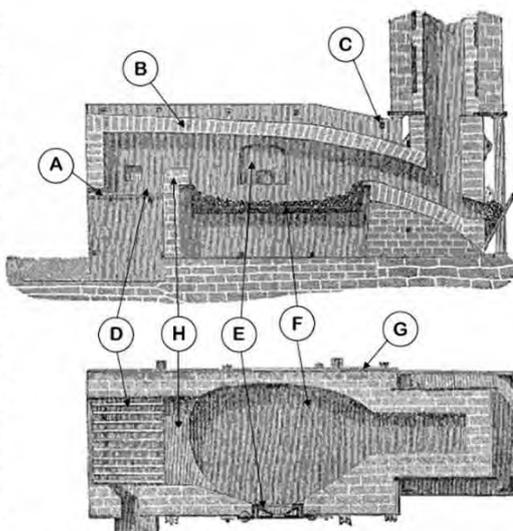
## fours « Appolt »



Four avec récupération des sous-produits (1867)

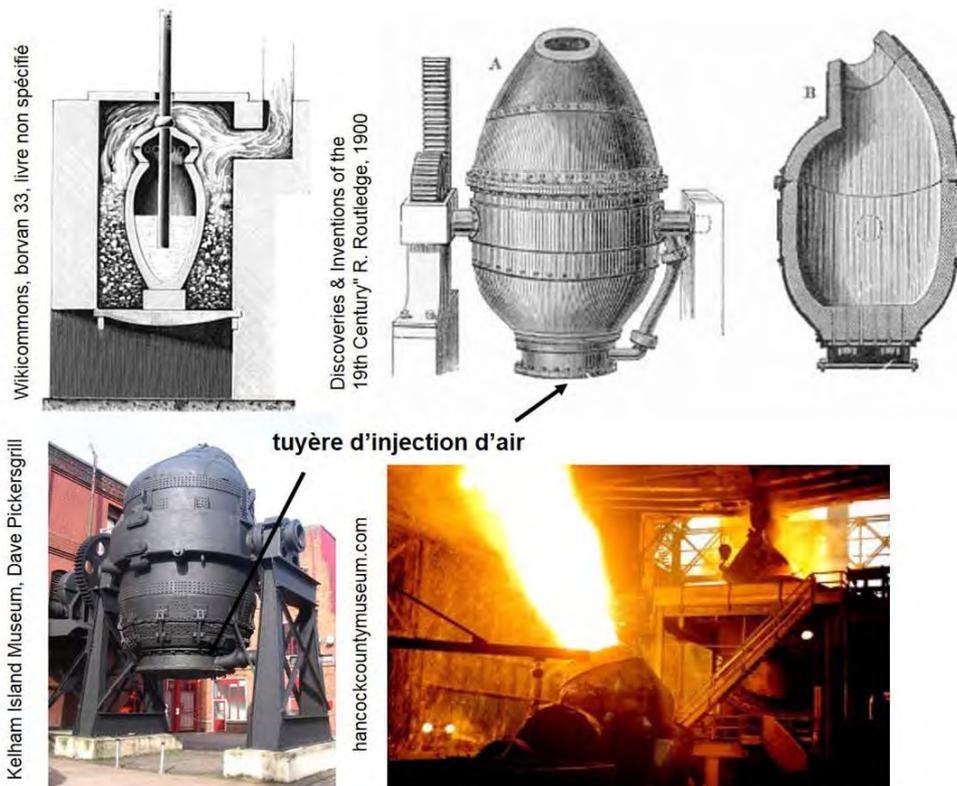
## fours à récupération des sous-produits

Il restait au cours du XVIII<sup>ème</sup> siècle un dernier maillon de la chaîne métallurgique qui échappait au coke : la transformation de la fonte en fer ou acier. Un procédé, nommé **puddlage**, qui date de 1784, leva ce dernier verrou (Ledebur, 1895). Il consistait à brasser de la fonte en fusion pour lui ôter ses impuretés de manganèse, soufre, silicium, et pour la décarburer. Le brassage est nécessaire pour mettre le métal en fusion en contact avec l'oxygène de l'air. Au début très long et énergivore, le procédé fut amélioré en 1818 en utilisant une sole en fonte au lieu d'une sole en brique dans le four à réverbère, triplant ainsi le rendement. Finalement, en 1855, le procédé Bessemer fut mis au point : en injectant directement de l'air au sein de la fonte en fusion, on la convertissait en fer, tout en augmentant la température du milieu, car la réaction est exothermique. Ce procédé, à la fois très rapide et spectaculaire, permettait de transformer, dans les premiers « **convertisseurs Bessemer** », 7 tonnes de fonte en ½ heure, abaissant considérablement le coût du fer et de l'acier.



(gauche) Un four à puddler. A : grille; B : voute réverbérante; D : feu; E : porte de travail; F : fonte. (droite) Un four à puddler. La personne de gauche brasse et celle de droite retire une boule de fer.

## puddlage



Wikicommons, borvan 33, livre non spécifié

Discoveries & Inventions of the 19th Century" R. Routledge, 1900

Kelham Island Museum, Dave Pickersgrill

hancockcountymuseum.com

tuyère d'injection d'air

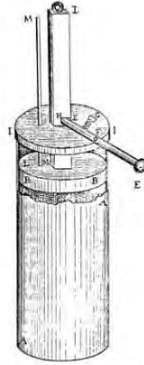
(en haut à gauche) Prototype utilisé par Bessemer, 1855. (en haut à droite) Convertisseur Bessemer, 1900. (en bas à gauche) Convertisseur Bessemer, début XX<sup>ème</sup> siècle. (en bas à droite) Convertisseur Bessemer en fonctionnement.

## convertisseurs Bessemer

### B. La machine à vapeur

Les premières machines qui conduisirent *in fine* à une machine à vapeur fonctionnelle furent conduits vers la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle (Thurston, 1886). Ainsi, **la machine de Papin**, qui date de 1690, montrait le principe de la création d'une force mécanique significative par la vapeur. Néanmoins, en l'absence d'un système permettant de condenser rapidement la vapeur d'eau, la machine ne pouvait avoir réellement d'applications. En 1698, la « **pompe à feu** » de Savary, une machine permettant de pomper de l'eau, fut mise au point : de la vapeur d'eau était injectée dans un cylindre, puis condensée en versant de l'eau sur le cylindre. Cette machine ne créait pas de force mécanique utilisable, mais aspirait l'eau dans le cylindre juste après la condensation de vapeur. En dépit de sa très forte consommation en combustible, cette machine fut utilisée pour pomper de l'eau dans certaines mines.

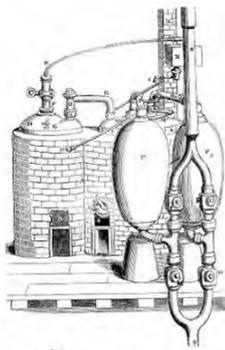
Nova Methodus ad Vires Motrices...  
D. Papin, 1690



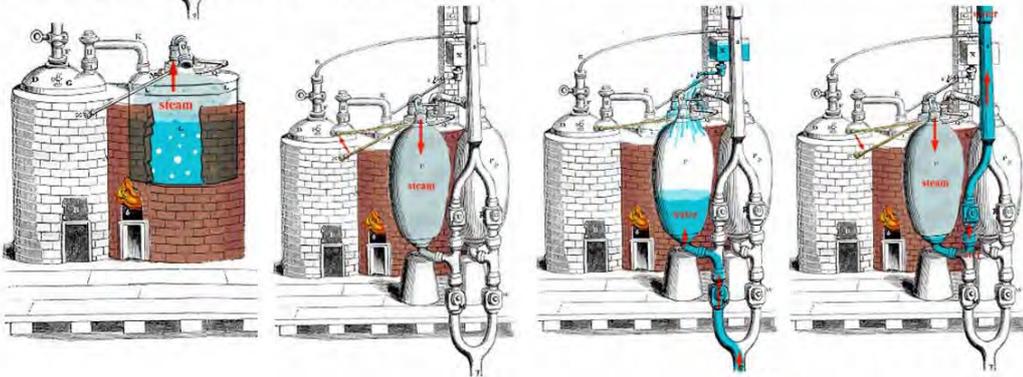
## la machine de Papin

Machine de Papin, 1690.

History of the growth of the steam engine, R.H. Thurston, 1886



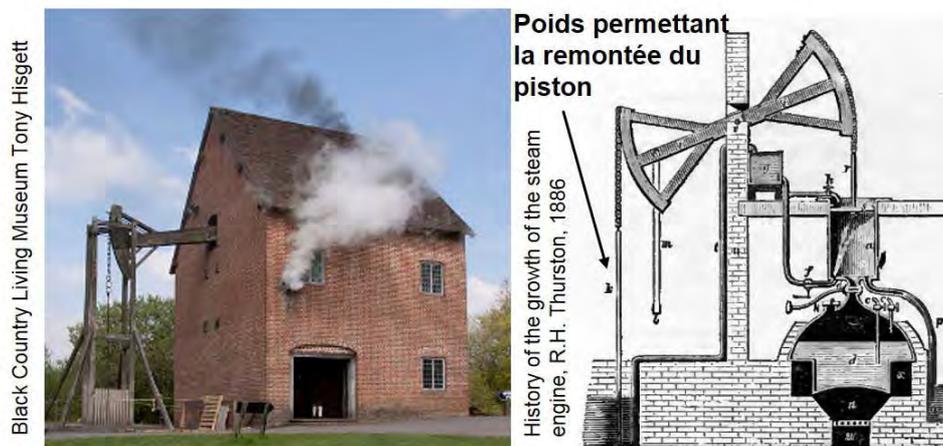
(haut) Pompe à feu de Savary, 1698. (bas) Fonctionnement de la pompe à feu. 1. De la vapeur est produite par un réservoir chauffé rempli d'eau. 2. La vapeur est injectée dans deux gros réservoirs. 3. La vapeur est condensée en pulvérisant de l'eau sur les réservoirs remplis de vapeur, créant le vide. 4. Des vannes sont ouvertes, et mettent en communication les réservoirs sous vide avec l'eau à pomper, qui monte dans les réservoirs. 5. Des vannes sont fermées et ouvertes, mettant les réservoirs remplis d'eau en communication avec le circuit d'évacuation. 6. De la vapeur est injectée dans les réservoirs et chasse l'eau. 7. Les réservoirs sont isolés du circuit d'évacuation. 8. On recommence à 3.



## pompe à feu

La **machine de Newcomen** – appelée également machine atmosphérique – date de 1712 et combinait dans une même machine le principe de création d'une force mécanique et la présence d'un système de condensation. Il s'agissait de la première machine transformant de l'énergie thermique en une énergie mécanique utilisable. Le cœur de cette machine était constitué d'un piston et d'un cylindre. Dans ce dernier, étaient injectées successivement de la vapeur d'eau, puis de l'eau. L'injection d'eau provoquait une condensation brusque de la vapeur, et donc une chute brutale de pression dans le cylindre. La pression atmosphérique – d'où le nom de la machine – exercée sur le piston conduisait à la descente de ce dernier dans le cylindre. La remontée du piston était induite par un poids. Les premiers modèles de machine à vapeur étaient connectés à une pompe par l'intermédiaire d'un balancier et servaient exclusivement à l'élévation de l'eau. Elles furent donc d'abord utilisées pour l'exhaure des mines,

mais également pour l'assèchement des marais ou l'alimentation en eau de villes ou de jardins. La puissance développée par les premiers exemplaires était d'environ 4 kW pour un diamètre de cylindre de 56 cm, mais l'augmentation du diamètre de ce dernier permit d'atteindre dans les décennies suivantes des puissances de plus de 50 kW (Lovland, 2007). Le succès de cette machine en Angleterre fut immédiat, et sa première diffusion en dehors de l'Angleterre démarra quelques années seulement après la première installation : Russie (1717), Hongrie (1723), Belgique (1725) et France (1732) furent ainsi les premiers pays à adopter la nouvelle machine. On peut noter que, dans certaines industries, les premières machines à vapeur furent utilisées pour élever de l'eau alimentant des roues hydrauliques, permettant ainsi de conserver tout le système mécanique pré-existant.



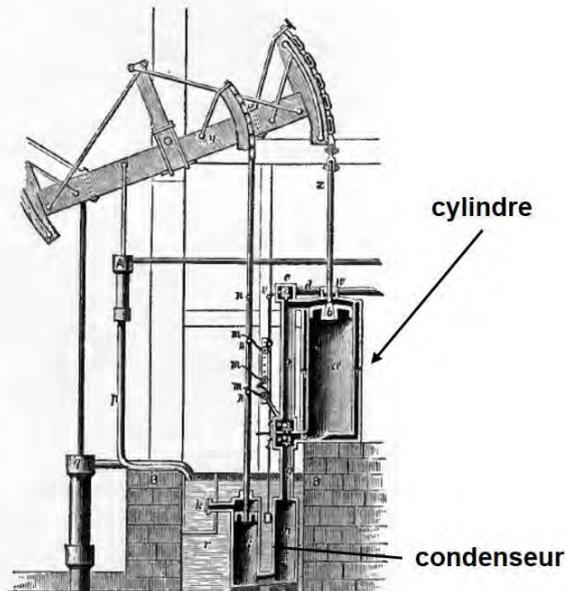
(gauche) Reconstruction (fonctionnelle) de la machine de Newcomen.  
(droite) Machine de Newcomen, 1712 .

## machine de Newcomen

Un des points-clé de la fabrication de ces machines était l'étanchéité entre le cylindre et le piston, qui nécessitait un alésage du cylindre de grande précision. Les évolutions qui avaient eu lieu dans le domaine des machines-outils vers la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle furent un des facteurs qui conduisirent à l'amélioration des caractéristiques de la machine. En dehors de ce point, la machine à vapeur fut l'objet de plusieurs innovations technologiques, dont on se limitera à citer les principales, dues à Watt. La première fut l'installation d'un **condenseur externe** au cylindre, permettant d'éviter de refroidir le cylindre lors de la condensation de la vapeur d'eau, et ainsi d'économiser du combustible. La deuxième consistait à injecter de la vapeur lors de la remontée *et* la descente du piston, conduisant à la **machine « à double-effet »**, dont le premier exemplaire date de 1783. La troisième fut la transformation du simple mouvement alternatif linéaire des premières machines en mouvement rotatif, rendu possible par l'adaptation de divers systèmes à la machine à double effet. La quatrième fut l'utilisation d'un **régulateur à boules** – qui était déjà utilisé depuis peu dans les moulins à vents –, afin de conditionner la quantité de vapeur admise dans le cylindre à la vitesse de rotation de la machine, et d'ainsi réguler cette dernière. La puissance

développée par les machines de Watt restait dans la gamme de celle des machines de Newcomen, car la puissance développée par ces différentes machines – qui restaient des machines atmosphériques – dépendaient principalement du diamètre du cylindre. En revanche, les machines de Watt consommaient nettement moins de combustible, en raison des améliorations réalisées.

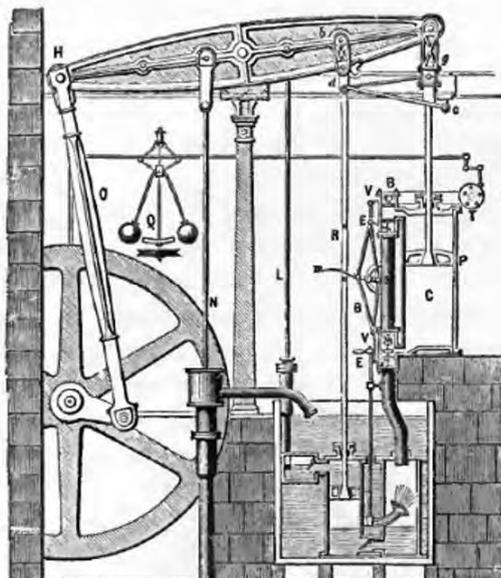
History of the growth of the steam engine, R.H. Thurston, 1886



*Machine à simple effet de Watt, 1774.*

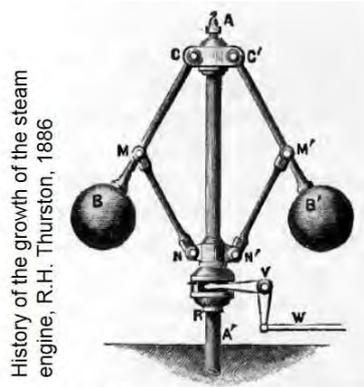
### condenseur externe

History of the growth of the steam engine, R.H. Thurston, 1886



*Machine à double effet de Watt.*

### machine « à double-effet »



History of the growth of the steam engine, R.H. Thurston, 1886

## régulateur à boules

Régulateur à boules

La voie vers les fortes puissances fut ouverte par les machines de Trevithick (1799) qui fonctionnaient à **haute pression**, et n'utilisaient plus la condensation de la vapeur, mais sa pression pour exercer une force sur le cylindre. Une machine fonctionnant à 10 bars de pression nécessite un cylindre d'une surface 10 fois moins importante qu'une machine atmosphérique pour une puissance équivalente. Ceci permit donc de fabriquer la locomobile (voir plus loin), source d'énergie mécanique compacte pouvant être transportée d'un point d'utilisation à un autre, et également la première locomotive (premier prototype en 1801), ouvrant donc la voie à une véritable révolution dans le domaine des transports. En augmentant la pression de la vapeur et la taille des cylindres, la puissance de ces dernières augmenta considérablement, passant par exemple d'environ 75 kW en 1835 à 400 kW en 1875 aux Etats-Unis, et atteignant plusieurs MW au cours du siècle suivant (White, 1979). Bien entendu, les machines à haute-pression ne furent pas utilisées que pour des applications « mobiles » et permirent d'augmenter considérablement la puissance délivrée par les machines à vapeur fixes.



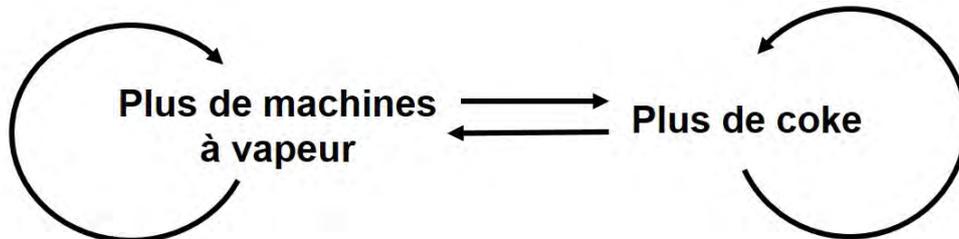
Science Museum, gracesguide.co.uk

Machine haute-pression de Trevithick, 1812.

## haute pression

### C. Les rétroactions positives

L'utilisation du coke en sidérurgie et la machine à vapeur sont deux inventions quasi-simultanées qui ont eu une série de **rétroactions positives**<sup>191</sup> sur elles-mêmes mais également l'une vers l'autre, permettant leur essor réciproque. On peut donc les classer en quatre catégories :



#### rétroactions positives

- **plus de coke entraîne plus de coke**

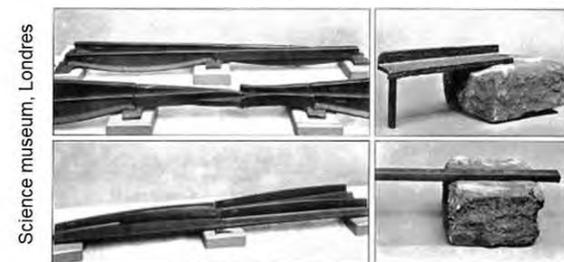
Une première conséquence du développement du coke fut la baisse du prix de la fonte. Ainsi, les chariots hippomobiles utilisés pour le transport de houille ou de coke furent équipés de roues en fonte (1729) à la place de roues en bois, leur permettant de transporter des quantités plus importantes de coke ou de houille. La fonte fut également utilisée à partir de 1767 pour fabriquer des rails, en remplacement de ceux en bois équipant les sites miniers.



L'art d'exploiter les mines de charbon de terre, M. Morand, 1768



London Magazine, 1764



Science museum, Londres

(en haut à gauche) Chariot de charbon dans les mines de Newcastle, UK, 1768. (en haut à droite) Chariot : roue avant en fonte, roue arrière en bois, rails en bois, UK, 1764. (bas) Rails en fonte dans les mines anglaises, 1800.

#### plus de coke entraîne plus de coke

<sup>191</sup> Une rétroaction positive est la conséquence d'un phénomène renforçant le phénomène lui-même. Il ne s'agit donc pas d'un jugement de valeur.

- **plus de coke entraîne plus de machines à vapeur**

De même, alors que dans la première machine à vapeur de Newcomen, le cylindre était en laiton, la fonte fut utilisée dès 1743, diminuant drastiquement son prix (Thurston, 1886).



Peter Skynner, Black country living museum



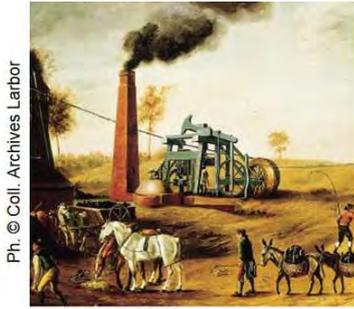
Chris Allen, Newcomen Engine House

(gauche) Cylindre en laiton dans la reconstitution de la première machine de Newcomen, 1712, Dudley, UK. (droite) Cylindre en fonte dans une machine de Newcomen, fin XVIII<sup>ème</sup> siècle, Dartmouth, UK.

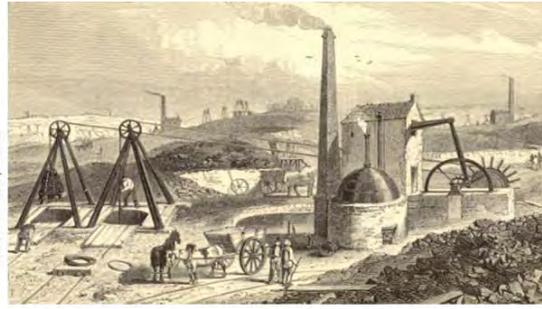
**plus de coke entraîne plus de machines à vapeur**

- **plus de machines à vapeur entraîne plus de coke**

Les premières machines à vapeur furent utilisées pour extraire l'eau des mines, en particulier des mines de charbon. Ainsi, William Pryce, propriétaire anglais de mines, mentionne en 1778 que « *l'invention de la machine à feu par Mr Newcomen nous permet de creuser des mines à des profondeurs deux fois plus importantes que celles accessibles par n'importe quel autre système précédent* ». Il mentionne également la très forte consommation en charbon de ces premières machines, qui sera fortement réduite dans les machines à double-effet de Watt (Thurston, 1886). Par la suite, dès la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, la machine à vapeur fut utilisée pour remonter le charbon du fond des mines par l'action de treuils. Peu de temps après, en 1812, quand la première locomotive à vapeur commerciale fut mise en service, sa première utilisation fut pour le transport de houille à proximité des houillères. En 1860, la mise au point d'un ventilateur très efficace, entraîné par une machine à vapeur, rendit possible l'aération et donc l'exploitation de galeries de charbon à des profondeurs inenvisageables jusqu'alors.



Ph. © Coll. Archives Labor



Cyclopaedia of Useful Arts, C. Tomlinson, 1852



The Collier, R. Havell 1814

patheoldminer.rootsweb.ancestry.com

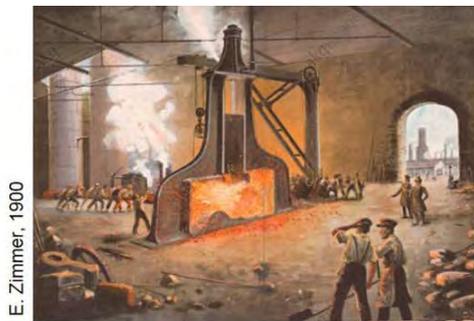


(en haut à gauche) Mine de charbon, UK, 1800. (en haut à droite) Machine de Watt pour remontée du charbon, UK, 1840-1850. (en bas à gauche) Locomotive pour transport du charbon sur la 1<sup>ère</sup> ligne de chemin de fer, UK, 1814. (en bas au milieu et à droite) 400 fours à coke alimentés par une voie ferrée, USA, 1920-1930.

### plus de machines à vapeur entraîne plus de coke

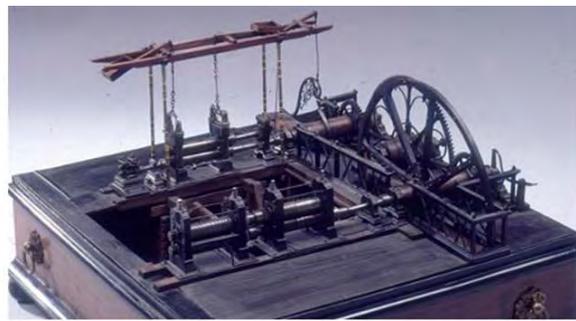
- plus de machines à vapeur entraîne plus de machines à vapeur

La vapeur fut également utilisée en 1792 pour alimenter en énergie les laminoirs, qui utilisaient jusqu'alors l'énergie hydraulique, et pour alimenter le premier marteau-pilon, en 1841. Ce dernier rendait possible la fabrication en série de grosses pièces métalliques, et donc de baisser le prix des machines en général, et des machines à vapeur en particulier.

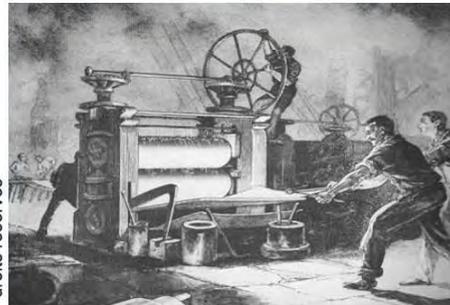


E. Zimmer, 1900

Technisches Museum, Vienne



droits réservés



droits réservés

(en haut à gauche) Marteau-pilon à vapeur, UK, 1842. (en haut à droite) Modèle réduit de laminoire à vapeur, 1800. (en bas à gauche) Marteau-pilon de 100 tonnes, Le Creusot, 1877. (en bas à droite) Laminoir à vapeur, fin XIX<sup>ème</sup> siècle.

### plus de machines à vapeur entraîne plus de machines à vapeur

En dehors de ces rétroactions positives assez directes, la machine à vapeur et la forte augmentation de la production de charbon ont eu des rétroactions plus indirectes. La première fut la facilitation des transports. Ainsi, le premier transport fructueux de passagers sur un **bateau à vapeur** eu lieu en 1783 en France, et en 1787 aux Etats-Unis (sur un bateau à rames !). La marine à vapeur pris par la suite un rapide essor. L'apparition d'une **drague à vapeur**, en 1797, en Angleterre, permit de faciliter le travail de curage des ports. La facilitation des transports permit notamment d'**exporter** le charbon des zones de production minières vers toutes les zones utilisatrices.



Musée de la Marine



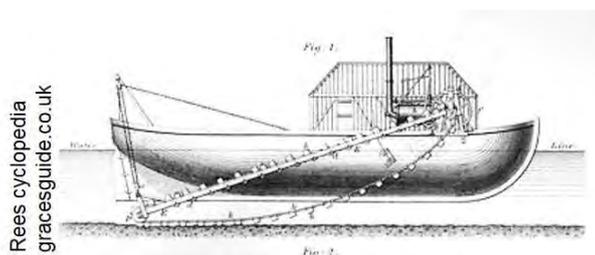
K. Beggrov, Bib. Mun. de Nancy



Droits réservés

(haut) Premier bateau à vapeur, France, 1783. (bas) Premier bateau à vapeur américain, à rames (!), 1787.

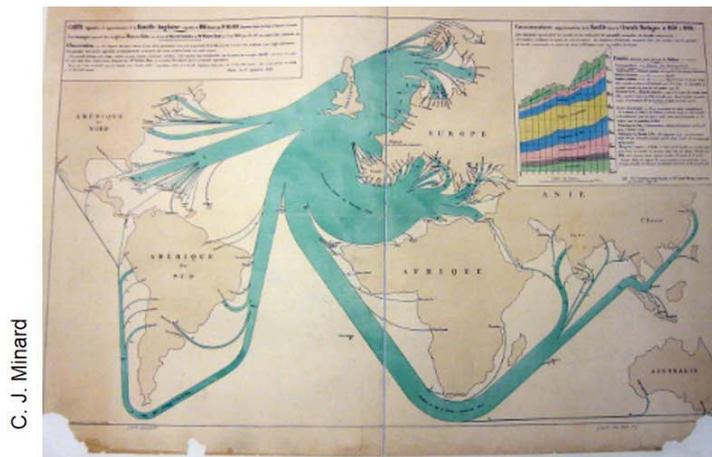
## bateau à vapeur



Rees cyclopedia  
gracesguide.co.uk

Drague à vapeur, UK, 1806

## drague à vapeur



Exportation de charbon anglais, 1850

## exporter

La deuxième rétroaction concerne l'agriculture. D'une part, l'essor de la métallurgie permit une large dissémination à bas coût des outils en fer déjà existants, comme les faux, les charrues, etc. D'autre part, la nouvelle source d'énergie mécanique concentrée que constituait la machine à vapeur eut des applications diverses en agriculture, dont on se bornera à citer quelques exemples. Le premier est l'installation, très peu de temps après leur mise au point, de machines à vapeur à double-effet destinées à entrainer des meules. Les premières **meules à vapeur** furent installées à Londres dans un grand bâtiment (*Albion Mills*), qui comprenait deux machines à vapeur de 37 kW chacune, permettant d'alimenter à elles deux vingt meules. Ceci permettait de produire dans l'ensemble du bâtiment environ 4 tonnes de farine par heure (Woollard, 2012). Un deuxième exemple de procédé qui a été largement accéléré pendant cette période est le battage, processus lent, et dont la mécanisation n'avait jamais eu lieu. Ainsi, une première **batteuse mécanique** fut développée en 1788, et était à cette époque entraînée par un manège ou une roue hydraulique. A partir de 1812, une batteuse fut pour la première fois alimentée par une machine à vapeur à haute pression, relativement compacte. Mais c'est surtout le développement de la **locomobile** (1845), source d'énergie itinérante pouvant aller d'exploitations en exploitations, qui permit un gros essor de la mécanisation agricole. La locomobile pouvait ainsi alimenter des batteuses, mais également moulins, charrues, pressoirs, etc (L. Figuiet, 1867). Une bonne illustration de la transformation agricole engendrée par la machine à vapeur est le catalogue de l'Exposition Universelle de 1851, qui eut lieu à Londres dans une Angleterre en pleine révolution industrielle, et qui foisonne de machines agricoles en tout genre (Great Exhibition, 1851).

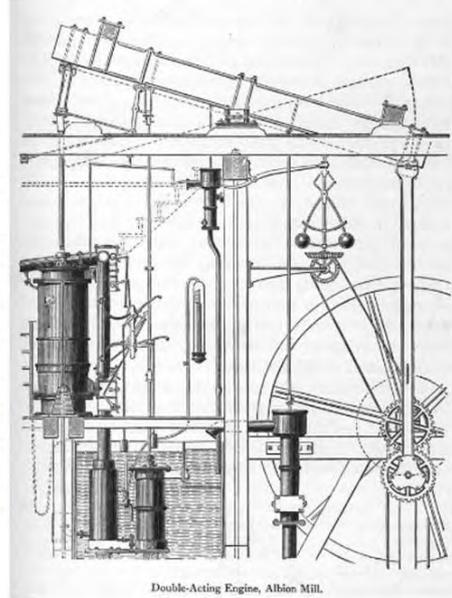
repro-tableau.com



T. Rowlandson; 1808-1811



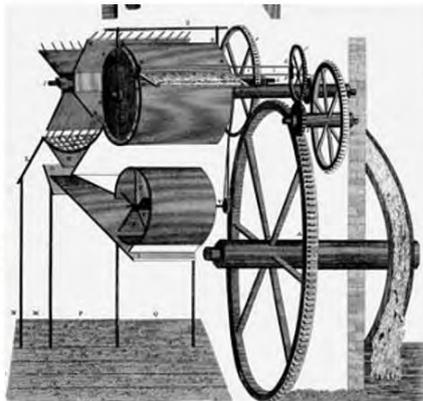
S. Smiles, Live of the enginners, 1865



(en haut à gauche) Plans d'Albion Mills.  
(en bas à gauche) Incendie à Albion Mills, 1791. (droite) Machine à double-effet installée à Albion Mills.

## meules à vapeur

Science museum, 1811



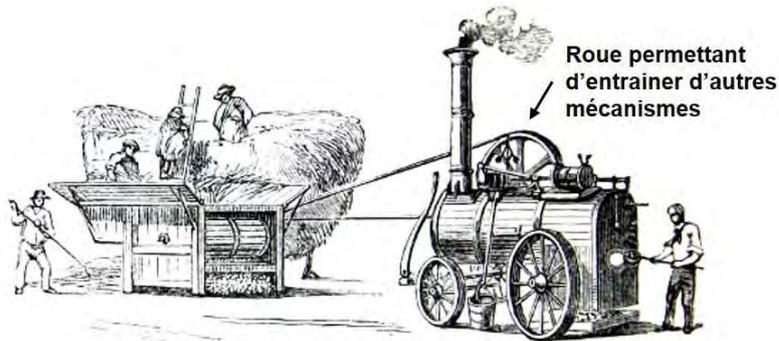
Science Museum, gracesguide.co.uk



(gauche) Batteuse hydraulique, Ecosse, 1811. (droite) Machine haute-pression de Trevithick, installée en 1812 dans une mine, et similaire à celle installée la même année pour alimenter une batteuse.

## batteuse mécanique

Catalogue de la grande exposition de Londres, 1851, gracesguide.co.uk



Locomotive utilisée pour entrainer une batteuse, Londres, 1851

## locomobile

La révolution industrielle fut accompagnée d'un fort transfert des activités agricoles vers des activités de production. Là encore, dans quelle mesure ce transfert est plutôt une cause ou une conséquence de la révolution industrielle fait l'objet de débats entre historiens. En tant que cause, on peut noter que, parmi les pays européens, l'Angleterre avait avant la révolution industrielle un taux d'urbanisation plutôt élevé, favorisant ainsi la monétarisation, l'innovation, etc. Parmi les conséquences, on peut noter que la mécanisation permet d'utiliser moins de main d'œuvre pour les travaux des champs, mais également d'augmenter les rendements en facilitant, par exemple, le transport de produits destinés à amender les champs.

Enfin, les schémas de la Figure 1 permettent de résumer le changement radical ayant eu lieu lors de la révolution industrielle en matière de métallurgie. Dans l'ancien système, les deux sources énergétiques étaient le bois et l'eau. Le bois intervenait à chaque étape du processus conduisant du minerai de fer à l'acier : haut- ou bas-fourneau, affinage, et mise en forme. La force hydraulique servait à actionner les soufflets, martinets et autres machines nécessaires. La métallurgie était donc basée sur l'utilisation de deux ressources renouvelables : l'eau et le bois. Bien sûr, ce dernier a un statut particulier, car il est *en principe* renouvelable, mais peut également être non-renouvelable en cas de déforestation ou de consommation de bois supérieure à ce que produit la forêt. Dans le nouveau système, eau et bois disparurent complètement au profit du charbon qui intervenait désormais à chaque étape de la transformation.

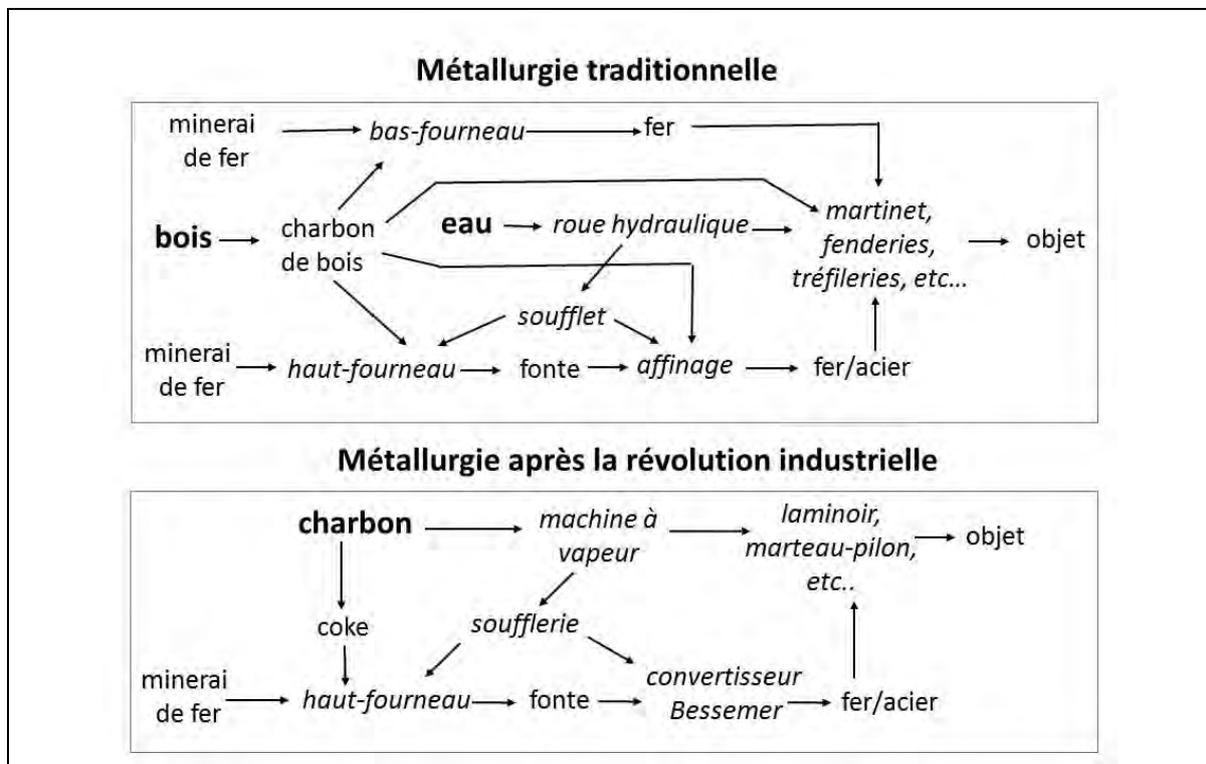


Figure 1 : Schémas simplifiés résumant la différence dans les procédés métallurgiques avant et après la révolution industrielle.

Comme nous allons le voir plus précisément dans la partie suivante, ce changement n'était pas seulement qualitatif, mais également quantitatif, car la révolution industrielle a permis une augmentation considérable de la production métallurgique, permettant de fabriquer des machines qui ont eu des applications dans de nombreux domaines (transport, agriculture, construction, ...).

## **CHAPITRE IV : UNE TRANSITION ENERGETIQUE**

Dans cette partie, nous donnons plus de détails sur la transition énergétique ayant eu lieu lors de la révolution industrielle. L'objectif est de fournir des chiffres et données quantitatives qui nous apparaissent les plus intéressants afin de fixer les ordres de grandeur en jeu. Nous commencerons par présenter quelques notions de base et ordres de grandeur sur l'énergie en général, puis présenterons le système énergétique traditionnel, utilisé pendant l'Antiquité et au Moyen Âge, avant de présenter l'évolution du système énergétique pendant et après la révolution industrielle.

### **A. Quelques mots sur l'énergie**

L'énergie est probablement la plus importante notion en physique. Son utilisation dans de nombreux domaines différents a conduit au développement de plusieurs unités pour la mesurer. Ainsi, si le joule (J) est l'unité officielle de l'énergie, on trouve également l'électron-volt en physique atomique, le kWh, la tonne-équivalent-pétrole (TEP) ou la tonne-équivalent-charbon (TEC) pour les consommations énergétiques des sociétés humaines, la calorie pour l'énergie liée au fonctionnement du corps humain ou l'unité fourragère pour l'énergie délivrée aux animaux. Dans ce livre, nous avons choisi comme unité d'énergie principale le kWh/jour/hab, suivant en cela le livre très pédagogique de David JC MacKay « Sustainable energy – without the hot air » (disponible également en français), que nous conseillons aux lectrices et lecteurs désireux de réfléchir à notre monde moderne en termes d'énergie (MacKay, 2009). Le kWh/jour/hab correspond donc à la consommation énergétique en kWh d'une personne pendant une journée. Cette unité doit son intérêt au fait que les nombres qui nous concernent sont généralement compris entre 0.2 et quelques centaines, et que les comparaisons, évaluations et mémorisations en sont ainsi grandement facilitées. Pour effectuer des conversions vers d'autres unités couramment utilisées dans ce domaine, notons que 1 kWh/jour correspond à une puissance consommée ou produite de 41 W en continu, et que 1 kWh correspond à 3,6 MJ. Egalement, une autre unité couramment utilisée dans les calculs énergétiques est le GJ/année/hab, qui est assez proche du kWh/jour/hab, puisque 1 GJ/année/hab = 0,76 kWh/jour/hab. Afin de donner dès à présent quelques ordres de grandeur utiles sur ce que représente le kWh/jour, quelques chiffres approximatifs d'énergie dépensée ou fournie sont présentés dans le Tableau 1 ; certains d'entre eux seront repris par la suite.

Energie mécanique maximale fournie par un humain	0,4 kWh/jour
Nourriture consommée par un humain	3 kWh/jour
Energie solaire typique reçue par m <sup>2</sup> en Europe	3,5 kWh/jour
Energie mécanique maximale fournie par un cheval	5 kWh/jour
Energie stockée dans le blé produit par 1 ha de champ au Moyen Âge (2,2 kg de blé par jour)	10 kWh/jour
Energie chimique du bois de chauffage produit par 1 ha de forêt (3,5 kg de bois sec par jour)	17 kWh/jour
Nourriture consommée par un cheval	20 kWh/jour
Energie mécanique produite par un moulin à eau antique tournant 10h par jour (puissance de 2 kW)	20 kWh/jour
Energie consommée actuellement pour le chauffage en France	20 kWh/jour/hab
Energie produite par un hectare de prairie sous forme d'herbe (28 kg par jour)	45 kWh/jour
Energie consommée actuellement pour le transport en France	50 kWh/jour/hab
Energie mécanique produite par un moulin à vent tournant 10h par jour (puissance de 4-8 kW)	60 kWh/jour
Energie moyenne consommée de nos jours en Europe	150 kWh/jour/hab
Energie mécanique produite par une machine à vapeur à double-effet de la fin du XVIII <sup>ème</sup> siècle, et fonctionnant 10h/jour	370 kWh/jour

**Tableau 1 : Quelques valeurs d'énergie exprimées en kWh/jour.**

## **B. Types d'énergie et rendement dans le système énergétique traditionnel**

Nous appellerons dans cet article « système énergétique traditionnel » le système énergétique basé sur le travail humain et animal, le bois, l'eau et le vent, et « système énergétique moderne » celui basé majoritairement sur les énergies fossiles. Comme cela sera détaillé un peu plus loin, la transition entre les deux systèmes n'a pas été uniforme en temps et en lieu, et ne peut être identifiée de manière univoque par la révolution industrielle : certains pays utilisaient des énergies fossiles bien avant la révolution industrielle, et quelques rares régions de notre monde actuel fonctionnent encore peu ou prou avec un système énergétique traditionnel. Néanmoins, le fait d'identifier la révolution industrielle comme la période de transition entre les deux systèmes est une simplification largement justifiée, et que nous adopterons.

Nous allons maintenant détailler le système énergétique traditionnel. Il nous paraît important de commencer par distinguer dès à présent deux formes d'énergie de nature et d'usage très différent : l'énergie thermique et l'énergie mécanique. La première est utilisée pour le chauffage et l'éclairage des maisons par le feu, ainsi que pour de nombreuses activités de fabrication dans lesquelles une source de chaleur est nécessaire : métallurgie, poterie, verrerie et chimie, notamment. Dans le système traditionnel, cette énergie était fournie de manière

quasi-exclusive par le bois, si l'on néglige la part, relativement faible, des graisses animales et végétales utilisées pour l'éclairage. L'énergie mécanique, elle, était également utilisée pour de nombreux usages : alimentation (travail de la terre, dépiquage, broyage, pressage, puisage et élévation de l'eau), métallurgie (broyage du minerai, forge, exhaure), tissage, transport, construction, etc. Cette énergie a eu par contre des sources plus diversifiées : le travail humain, le travail animal, et l'énergie hydraulique ou éolienne. Une partie des concepts que nous allons présenter maintenant, ainsi que les chiffres de rendements associés, sont résumés dans le Tableau 2.

Les besoins en énergie thermique étaient dans l'Antiquité et au Moyen Âge majoritairement liés au chauffage. Ils dépendaient fortement du climat et donc de la région d'habitation. Ainsi, durant le Moyen Âge, la consommation quotidienne en bois de chauffage par habitant pouvait s'élever à 10 kg dans les régions du Nord de l'Europe, alors qu'elle était d'1 kg dans les plaines italiennes, la moyenne européenne se situant autour de 2,5 kg (Kander, 2013). En prenant en compte l'énergie chimique du bois sec (18 MJ/kg), ce dernier chiffre correspond à 12,5 kWh/jour/hab. En l'absence de chauffage superflu – luxe qui ne s'est développé qu'après la révolution industrielle – et d'évolution significative dans les rendements des moyens de chauffage, la consommation de bois pour le chauffage est une valeur qui est *a priori* restée relativement stable depuis l'Antiquité jusqu'à la fin du Moyen Âge.

L'utilisation du bois est une forme indirecte d'utilisation de l'énergie solaire, dont on peut calculer approximativement le rendement. Ainsi, si l'on considère qu'un hectare de forêt produit environ 3,5 kg de bois sec de chauffage par jour, on montre qu'un hectare de forêt produit environ 17 kWh/jour (Smil, 1999 ; Vallauri, 2003). En utilisant la valeur moyenne d'énergie solaire reçue par cette forêt (3,5 kWh/m<sup>2</sup>), on arrive à un rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique sous forme de bois de chauffage de l'ordre de 0,05 %. Ensuite, la combustion du bois transforme son énergie chimique en énergie thermique. Le rendement d'une cheminée ou d'un brasero, qui étaient les moyens de chauffage les plus utilisés durant ces périodes, est de l'ordre de 10%, car la combustion du bois y est incomplète, et qu'une grande quantité de chaleur est perdue dans les fumées ou l'air quittant la maison. *In fine*, le rendement global de la conversion d'énergie solaire en énergie thermique utile était donc de l'ordre de 0,005%. Cette valeur, indiquée dans la dernière colonne du Tableau 2, est la multiplication des rendements de chaque étape de transformation (0,05%×10%), et ce sera le cas pour tous les processus qui seront détaillés ci-dessous.

	Type d'énergie	Conversion et son rendement	Type d'énergie	Conversion et son rendement	Type d'énergie	Conversion et son rendement	Type d'énergie	Rendement global
<b>Chauffage</b>	Energie solaire	Photosynthèse 0,05%	Bois mort, énergie chimique	Combustion dans une cheminée 10%	Energie thermique			<b>0,005%</b>
<b>Métallurgie</b>	Energie solaire	Photosynthèse 0,085%	Bois de taillis, énergie chimique	Combustion dans une meule 40%	Charbon de bois, énergie chimique	Combustion dans un four, <50%	Energie thermique	<b>&lt;0,017%</b>
<b>Travail animal</b>	Energie solaire	Photosynthèse 0,13%	Prairie, énergie chimique	Refus 70% Métabolisme 20%	Energie mécanique			<b>0,018%</b>
<b>Travail humain</b>	Energie solaire	Photosynthèse 0,03%	Blé, énergie chimique	Métabolisme 13%	Energie mécanique			<b>0,004%</b>
<b>Moulins à vent</b>	Energie solaire	Vent 1,2%	Energie éolienne récupérable	Concentration × 30	Energie éolienne récupérable	Moulin, 20%	Energie mécanique	<b>0,24 %</b> (concentration × 30)
<b>Moulin à eau</b>	Energie solaire	Evaporation / condensation 0,055%	Energie de gravitation	Concentration par les rivières × 250 Concentration par les barrages × 100	Energie de gravitation et cinétique	Roue par en-dessous, 10%	Energie mécanique	<b>0,0055%</b> (concentration × 25000)

**Tableau 2 : Séries de conversions énergétiques utilisées dans le système énergétique traditionnel, ainsi que leurs rendements approximatifs.**

En parallèle, il existait une consommation de bois destinée à d'autres usages que le chauffage : verrerie, charbonnerie, métallurgie, etc. Les ateliers ou manufactures associés se localisaient de préférence à proximité ou au sein des forêts. Pour ces activités, la consommation en bois a varié plus fortement dans le temps que celle du bois de chauffage : d'une part, elle dépendait fortement de l'intensité de la production manufacturière, qui subissait des fluctuations; d'autre part, la consommation variait en fonction des rendements des fours utilisés pour la production. Ainsi, l'augmentation de la taille des fours au cours du Moyen Âge n'est sans doute pas étrangère à une volonté d'économiser un combustible précieux alors que la population ainsi que le nombre d'objets métalliques fabriqués par habitant augmentaient. En ce qui concerne les chiffres, on estime ainsi que la consommation de bois pour la production de fer uniquement s'élevait à 0,5 kWh/jour/hab en 1500 et 2,2 kWh/jour/hab en 1800. L'estimation pour la totalité des industries s'élève à 2 kWh/jour/hab en 1500 et 4,5 kWh/jour/hab en 1800 (Kander, 2013). Le calcul ci-dessous va être adapté au cas de la métallurgie, industrie-clé dans tous les systèmes techniques utilisant des outils en fer.

Pour calculer les rendements, nous supposons ici que les artisans ne se contentaient pas de ramasser du bois mort dans la forêt pour alimenter leurs industries, mais géraient les forêts en taillis<sup>192</sup>. Ceci est par exemple clairement le cas pour la fabrication du charbon de bois (Hardy, 2012). Dans ce cas, le rendement en bois est supérieur à celui obtenu lorsque des familles se contentent de ramasser du bois mort pour leur usage domestique. Nous retiendrons le chiffre de 6 kg/ha/jour, obtenu pour des taillis de 20 ans (Hardy, 2012), conduisant à une énergie de 30 kWh/jour, et à un rendement depuis l'énergie solaire de 0,085%. Il faut prendre également en compte qu'un certain nombre d'industries utilisaient le charbon de bois (c'est le cas pour la métallurgie), et que sa fabrication traditionnelle dans des meules était un procédé avec un rendement de l'ordre de 40% (Smil, 1999). En contrepartie, les procédés de manufacture utilisaient des fours en maçonnerie qui avaient un rendement plus élevé que les simples cheminées ouvertes, même s'il reste difficile de donner des chiffres compte tenu de la diversité des procédés. En supposant que ces rendements n'excédaient pas 50%, un procédé utilisant du bois ne pouvait donc avoir un rendement global depuis l'énergie solaire meilleur que 0,042%, et un procédé au charbon de bois comme la métallurgie un rendement meilleur que 0,017%. Nous avons indiqué dans le Tableau 2 cette dernière valeur, valable pour un procédé utilisant du charbon de bois.

L'importance quantitative du travail mécanique dans le système traditionnel a fait l'objet de nombreuses évaluations. A la lecture de la littérature à ce sujet, il faut garder à l'esprit que les valeurs données ou utilisées sont parfois de nature différente. A titre d'illustration, prenons l'exemple du travail humain. Un être humain consomme en moyenne 3 kWh/jour sous forme de nourriture, une valeur qui peut augmenter sensiblement en cas d'effort physique intense et continu. On considère que le travail mécanique maximal que peut fournir un humain moyen est de l'ordre de 0,4 kWh/jour. Si l'on cherche à évaluer l'énergie mécanique *réellement fournie* dans une population donnée, le chiffre est bien entendu plus faible, pour prendre en compte les enfants, les personnes âgées, les métiers nécessitant une activité physique réduite, les jours de repos, etc. Cette valeur est rarement donnée dans la littérature et, à titre d'illustration, nous supposerons qu'elle est la moitié de la valeur maximale, soit 0,2 kWh/jour. Nous nous retrouvons donc avec trois valeurs différentes, dont nous verrons plus loin qu'elles donnent lieu à des images différentes d'une même réalité lorsqu'elles sont utilisées. Si l'on prend maintenant l'exemple d'un moulin à eau ou à vent, les choses sont en général plus simples : les valeurs données sont souvent celles de la puissance mécanique fournie. Typiquement, pour un moulin à eau de l'Empire romain ou du Moyen Âge, une valeur communément utilisée dans la littérature est de 2 kW. S'il est utilisé tous les

---

<sup>192</sup> Le taillis consiste à couper les arbres à ras, et à les laisser refaire du bois à partir de la souche principale. Ceci permet d'obtenir plus rapidement du bois de taille moyenne, adapté à la fabrication de charbon de bois, par exemple.

jours pendant 10 heures, cela nous conduit à un chiffre de 20 kWh/jour. Pour un moulin à vent, les valeurs typiques sont dans la gamme 4-8 kW, ce qui conduit à une valeur comprise entre 40 et 80 kWh/jour (Kander, 2013).

Nous avons fourni plus haut quelques ordres de grandeur de rendement énergétique concernant l'énergie thermique fournie par le bois ou le charbon de bois, et allons maintenant faire de même concernant le travail mécanique, en commençant par le cheval. Le travail mécanique fourni par un animal dérive lui aussi de l'énergie solaire. Ainsi, l'animal, qu'il soit laissé paître sur un pâturage ou nourri par du foin ++ou des céréales absorbe de l'énergie solaire convertie en énergie chimique par la photosynthèse. Une prairie produit typiquement 10 t de matière sèche par an et par hectare (Smil, 1999), et chaque kg de matière sèche contient environ 5,7 MJ; l'énergie contenue dans l'herbe produite par la prairie et pouvant être consommée par le cheval est donc d'environ 45 kWh/jour/ha. Ceci nous permet de calculer que le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique est de l'ordre de 0,13% pour la prairie (en utilisant toujours le chiffre de 3,5 kW/m<sup>2</sup> pour l'énergie solaire). On considère généralement qu'il faut 20 kWh/jour pour nourrir un cheval (Smil, 1999). En prenant en compte que ce dernier délaisse certaines zones des prairies, ce « refus » étant de l'ordre de 30% de la surface, on retrouve un chiffre assez communément admis qu'une prairie d'un peu moins d'un hectare (ici, nous trouvons 0,65 ha) permet de nourrir un cheval. Le métabolisme animal permet ensuite de convertir cette énergie chimique en énergie mécanique, avec un rendement d'environ 20%, permettant au cheval de produire 5 kWh/jour d'énergie mécanique. Le rendement global de conversion d'énergie solaire en énergie mécanique par la prairie et le cheval est donc d'environ 0,018% (0,13%×70%×20%). Comme pour le travail humain, cette valeur de 5 kWh/jour correspond à l'énergie mécanique maximale que peut fournir un cheval par jour, mais pas nécessairement à l'énergie mécanique réellement fournie, car le cheval ne travaille pas forcément tous les jours, ni au maximum de ses possibilités. Il n'existe dans la littérature pas d'estimation de la valeur réellement fournie. Lorsque nous en aurons besoin plus bas, nous prendrons de manière quelque peu arbitraire le même taux de réduction que pour l'humain, ce qui conduit à une valeur de 2,5 kWh/jour pour l'énergie réellement fournie par le cheval. Il faut également garder en tête qu'un cheval de trait du XIX<sup>ème</sup> siècle, travaillant de manière intensive au champ, était également nourri par de l'avoine, dont le rendement depuis l'énergie solaire est proche de celui du blé (voir plus bas), et donc plus faible que pour l'herbe. Le rendement que nous avons calculé est donc probablement une valeur haute.

Pour faire une estimation de rendement dans le cas du travail humain, considérons un travailleur humain exclusivement nourri de blé. Les rendements en blé sont bien entendus extrêmement dépendants des régions et des époques, mais on prendra le chiffre de 800 kg/ha, qui est celui de la moyenne européenne en 1800 (Bairoch, 1989). Le blé a une valeur énergétique de 18 MJ/kg, ce qui

nous conduit à une production d'environ 10 kWh/ha, soit un rendement depuis l'énergie solaire d'environ 0,03%. Le travailleur humain, en utilisant les chiffres déjà donnés plus haut de 0,5 kWh/jour d'énergie mécanique pour une consommation de 3 kWh/jour, a un rendement d'environ 13%. Ceci conduit à un rendement global du travailleur humain depuis l'énergie solaire de 0,004%. Nous constatons donc que le rendement mécanique du travailleur humain depuis l'énergie solaire est beaucoup plus faible que celui du cheval, alors même que nous avons négligé que le travailleur humain a également besoin de forêt pour se chauffer, et mange généralement le blé sous forme de pain, ce qui réduit d'autant plus son rendement énergétique effectif par rapport au cheval.

Les moulins à eau et les moulins à vent sont également des systèmes convertissant l'énergie solaire de manière indirecte, puisque l'énergie solaire est à l'origine des vents et du cycle de l'eau. Pour les calculs ci-dessous, nous avons supposé que les moulins tournent 24h/24 et 7j/7. Les rendements finaux obtenus devraient être réduits d'un facteur 2.8 pour prendre en compte leur utilisation uniquement 10h/jour et 6j/7.

Commençons par le cas des moulins à vent. La puissance du vent typique en Europe est d'environ 100 W par m<sup>2</sup> de surface d'ailes du moulin. A. Betz montra en 1920 qu'au maximum 59% de cette puissance sont récupérables dans un moulin à vent (ce qui reste valable pour une éolienne moderne). Si on fait l'approximation très raisonnable que l'emprise au sol d'un moulin est la même que la surface de ses ailes, on obtient donc une énergie récupérable d'environ 60 W par m<sup>2</sup> de surface au sol, soit un rendement de l'énergie solaire vers le moulin qui serait de 35%. Ce rendement très élevé par rapport à tous ceux que nous avons vu jusqu'à présent mérite un commentaire: des moulins ne peuvent pas être collés les uns contre les autres de manière à fournir une énergie de 60 W/m<sup>2</sup>. Il faut respecter une distance entre moulins assez grande afin qu'ils ne subissent pas une forte chute de leur rendement. Ainsi, si l'on considère une grande surface couverte de moulins rapprochés le plus possible les uns des autres, et que l'on calcule l'énergie récupérable par m<sup>2</sup> de cette grande surface, la valeur descend à 2 W/m<sup>2</sup>, soit un rendement depuis l'énergie solaire de 1,2% (MacKay, 2009). Une autre manière de voir les choses est de considérer que le moulin collecte l'énergie du vent sur une surface beaucoup plus grande que sa seule emprise au sol, et la concentre donc. Cela conduit à un fort rendement par m<sup>2</sup> de surface du moulin mais à une valeur plus faible si on l'exprime par m<sup>2</sup> de la surface sur laquelle la collecte s'effectue. Dans le Tableau 2, nous avons indiqué ce phénomène en indiquant la valeur de rendement de 1,2%, et en indiquant une valeur pour la « concentration » de l'énergie. Dans le cas présent, cette valeur est de  $\times 30$ , puisque la puissance exprimée par m<sup>2</sup> de surface de moulin est 30 fois supérieure à la puissance délivrée par m<sup>2</sup> de surface de collecte. Ensuite, il faut également prendre en compte l'efficacité de la conversion de l'énergie du vent théoriquement récupérable en énergie mécanique réellement récupérée. En considérant que les ailes des moulins avaient un diamètre compris entre 20 et

30 m, et que les puissances mécaniques des moulins du Moyen Âge étaient comprises entre 4 et 8 kW (Kander, 2013), on trouve un rendement entre l'énergie du vent théoriquement récupérable en énergie mécanique réellement récupérée d'environ 20%. Ce rendement est due à une conception et une rigidité des ailes non optimale – par rapport à des éoliennes modernes, par exemple – mais également à l'utilisation d'engrenages en bois. Ainsi, il semblerait que ceux utilisés aux époques qui nous intéressent avaient un rendement d'environ 40% entre la puissance récupérée sur l'axe des ailes et celle récupérée sur le dispositif mécanique final (par exemple la meule) (De Decker, 2010).

Nous allons terminer ce tableau par le cas des moulins à eau. Là encore, leur énergie dérive de l'énergie solaire, qui est transformée en énergie potentielle de gravitation par l'évaporation de l'eau, puis la pluie. En considérant que les précipitations annuelles sont de 800 mm par an en Europe, et que l'altitude moyenne du continent européen est d'environ 300 m, on peut facilement montrer<sup>193</sup> que l'énergie potentielle de gravitation obtenue est d'environ 0,08 W/m<sup>2</sup>, soit un rendement depuis l'énergie solaire d'environ 0,055% (MacKay, 2009). Cette énergie subit un premier phénomène de concentration encore plus drastique que l'énergie éolienne : l'énergie hydraulique se concentre dans les rivières, qui représentent environ 0,4% de la surface d'un continent (Downing, 2012). On a donc une première concentration d'un facteur 250 de l'énergie hydraulique, qui peut atteindre 20 W par m<sup>2</sup> de rivière. Le deuxième phénomène de concentration est celui réalisé en choisissant une zone de la rivière propice et en y installant un barrage ou un aménagement adéquat. Il est plus difficile d'estimer simplement la valeur de concentration associée, et nous allons plutôt l'estimer à partir des caractéristiques des roues. La puissance des roues du Moyen Âge sont estimées à 2 kW, avec un rendement énergétique de 10 % pour les roues par en-dessous, les plus courantes; ceci signifie qu'elles ont reçu 20 kW d'énergie de l'eau. Si l'on fait l'hypothèse que la roue du moulin occupe 10 m<sup>2</sup> sur la rivière, cela signifie que l'énergie hydraulique des rivières a été concentrée d'un facteur 100 entre sa valeur moyenne sur la rivière et sa valeur sur la roue<sup>194</sup>. Globalement, le rendement du moulin à eau depuis l'énergie solaire est de 0,0055% (0,055% × 10%). Son facteur de concentration est par contre très élevé (× 25000), ce qui signifie qu'il faut une très faible surface de moulin à eau pour collecter cette énergie. L'énergie produite par m<sup>2</sup> de roue à eau est 1,4 fois (0,0055% × 25000) plus grande que l'énergie solaire reçue par m<sup>2</sup> de terre, en dépit du fait que l'énergie hydraulique dérive de l'énergie solaire. Ceci est possible uniquement parce que

---

<sup>193</sup> Il faut pour cela calculer la différence d'énergie potentielle entre l'eau qui tombe à une altitude moyenne de 300 m et l'eau qui arrive au niveau de la mer. L'énergie potentielle  $E$  est donnée par l'équation  $E = m g z$ , où  $m$  est la masse d'eau,  $g$  la constante d'accélération de la pesanteur, et  $z$  l'altitude. Si on prend la hauteur moyenne de l'Europe (300 m), et une valeur de précipitation de 800 mm, la puissance par m<sup>2</sup> est ainsi donnée par  $0,8 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3$  (densité de l'eau)  $\times 10 \text{ m}^2/\text{s} \times 300 \text{ m} / (365 \times 24 \times 3600)$ , soit 0,08 W/m<sup>2</sup>.

<sup>194</sup> Ce facteur 100 vient du rapport entre les 2 kW par m<sup>2</sup> de roue et les 20 W par m<sup>2</sup> de rivière.

l'énergie gravitationnelle de l'eau, au départ assez diluée sur le territoire, a été concentrée 25000 fois avant d'arriver sur la roue.

Nous venons donc de dresser un panorama des énergies principalement utilisées dans le système énergétique traditionnel et de leur rendement, à l'exception de l'énergie éolienne utilisée pour le transport (bateaux). Plusieurs constats peuvent être dressés à partir de ces données. Tout d'abord, en dehors de l'énergie éolienne qui se distingue de ce point de vue, toutes les sources d'énergie traditionnelle présentaient un rendement extrêmement faible depuis l'énergie solaire, dû à la présence d'une première conversion limitante : la photosynthèse ou le cycle de l'eau ont ainsi un rendement qui n'excède pas 0,13%. Les pertes de puissance dans la chaîne de conversion subséquente conduisaient donc à un rendement global qui, en dehors de l'énergie éolienne, n'excédait jamais 0,025%. Ensuite, il nous apparaît intéressant de discuter des spécificités des différents moyens permettant de créer de l'énergie mécanique dans le système traditionnel.

Le travail animal, lui, a un rendement bien supérieur à celui du travail humain, justifiant ainsi son intérêt dans le système énergétique traditionnel; c'est également la seule source de travail « mobile », pouvant donc être utilisée à différents endroits suivant les besoins, et par conséquent, utilisable pour le labour.

Nous avons ensuite les moulins, qui sont deux sources d'énergie mécanique « fixes ». Elles ont pour particularité d'être concentrées, et donc de rentrer faiblement en compétition avec l'espace nécessaire à l'agriculture ou au pâturage. Ainsi, 2 kW de force animale s'obtiennent en mobilisant presque 5 ha de prairie, une surface bien plus grande que celle d'un moulin à eau ou à vent. Dans le cas des moulins à eau, il s'agit même d'une absence totale de compétition, puisque ces derniers sont présents sur les rivières, et non pas sur les champs. C'est donc une des raisons permettant d'expliquer le succès des moulins: leur énergie mécanique n'est pas en compétition avec celle produite par les animaux, mais vient simplement s'y ajouter.

Comme nous le verrons plus loin, les moulins à eau ont eu une plus grande importance au Moyen Âge que les moulins à vent. Penchons-nous donc d'un peu plus près sur les chiffres du Tableau 2 et voyons s'ils nous permettent de l'expliquer. Le moulin à vent avait un rendement depuis l'énergie solaire environ 50 fois supérieur à celui des moulins à eau. Cela signifie que si, dans le système traditionnel, on avait souhaité maximiser l'énergie mécanique en couvrant un territoire de moulins à vents et de moulins à eau, on aurait obtenu *in fine* beaucoup plus d'énergie de la part des moulins à vent. Mais la situation dans le Moyen Âge occidental n'était pas celle-là : avec au maximum 100000 moulins à vent en Europe au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, soit environ 1 moulin par 50 km<sup>2</sup>, la problématique n'était pas – comme cela pourrait être le cas aujourd'hui – de produire le maximum d'énergie sur une surface limitée (Kander, 2013). Le succès du moulin à eau s'explique en fait par d'autres

raisons. D'une part, *après concentration*, le rendement par m<sup>2</sup> de surface de moulin est beaucoup moins important dans le cas du moulin à vent (7% contre 140%). Ce dernier est donc généralement un bâtiment plus grand que le moulin à eau, nécessitant un investissement plus important, et possédant un mécanisme plus complexe, en particulier pour les moulins à cabine orientable. Il convient néanmoins de nuancer ceci par le fait qu'il faille parfois associer au moulin à eau un barrage. La maintenance du moulin à vent est également plus conséquente, car les cas de casse des ailes ou de la queue<sup>195</sup> n'étaient pas rares (Durand-Vaugaron, 1967). De plus, les incendies pouvaient se produire à cause des frottements trop importants lorsque le meunier cherchait à freiner le moulin en cas de tempête (Hills, 1994). Il nécessitait également une surveillance plus accrue : en cas de vent fort, les toiles couvrant certaines ailes étaient retirées, et il fallait régulièrement orienter la cabine ou le moulin face au vent. De plus, sa valeur nominale de puissance cache le fait que cette puissance délivrée variait très fortement dans le temps, rejoignant ainsi une problématique posée par les éoliennes actuellement : il n'était pas rare d'avoir des périodes de plusieurs jours sans qu'un moulin à vent ne produise d'énergie. Il nécessitait donc un investissement et un accompagnement important, pour une énergie qui variait fortement dans le temps. Il permettait par contre de compenser certains défauts du moulin à eau: il était utilisable dans les zones dépourvues d'eau, dans les zones plates, pendant l'été quand l'eau vient à manquer dans certaines petites rivières, et pendant l'hiver dans les régions où l'eau gèle. Un moulin à vent était donc régulièrement associé à un moulin à eau, le meunier s'occupant des deux moulins, et utilisant le moulin à vent quand il ne pouvait utiliser celui à eau. Par exemple, en Bretagne, en 1870, on estime que, sur 550 moulins à vent, 134 étaient associés à un moulin à eau, les autres étant isolés (Durand-Vaugaron, 1967).

### **C. Répartition dans le système énergétique traditionnel**

Nous allons dans cette partie présenter comment l'énergie utilisée ou produite dans le système traditionnel se répartissait entre les différentes sources présentées précédemment, et comment cette répartition a évolué avec l'entrée dans le système moderne. Pour cela, nous nous appuierons sur différentes sources de la littérature, et nous chercherons à bien expliciter les méthodes et hypothèses prises par les auteurs. En effet, il est possible de présenter les mêmes données de différentes manières, conduisant à différentes images d'une même réalité.

---

<sup>195</sup> La queue, ou guivre, est le nom donné à la longue pièce de bois qui permet au meunier d'orienter la cabine du moulin depuis le sol.

Afin d'illustrer de manière plus concrète ce que nous entendons par cela, supposons que nous cherchions à évaluer l'importance du moulin à eau dans une micro-société composée de 100 humains et d'un moulin, en utilisant les 3 chiffres possibles cités plus haut pour l'énergie du travail humain : 3 kWh/jour/hab de consommation énergétique, 0,4 kWh/jour/hab de puissance mécanique maximale, 0,2 kWh/jour/hab de puissance moyenne réellement fournie. Si l'on prend le premier chiffre, on considère que les 100 humains consomment une certaine valeur énergétique (300 kWh/jour) et qu'un moulin produit de l'énergie mécanique (20 kWh/jour), qui est par exemple utilisée pour produire de la farine. Ce type de bilan est parfois présent dans la littérature, et met surtout en valeur la *quantité totale d'énergie nécessaire* pour faire fonctionner cette micro-société, sans se soucier de la nature de l'énergie. Le chiffre concernant les humains permettrait par exemple de calculer la surface agricole nécessaire pour les nourrir. Il ne permet par contre pas de conclure grand-chose concernant l'importance du moulin ou des humains dans le travail mécanique fourni. Si l'on prend le 2<sup>ème</sup> chiffre, on considère que les 100 humains pourraient produire 40 kW/jour d'énergie mécanique (mais ne le font pas forcément), et que le moulin produit 20 kWh/jour d'énergie mécanique. Ce bilan nous montre que la roue effectue le travail que pourraient fournir 50 humains. Il s'agit en quelque sorte d'un bilan sur la *force de travail* : dans cette société, il faudrait 150 humains au total pour effectuer le travail mécanique nécessaire à faire fonctionner la société, mais 1/3 de ces humains sont en fait remplacés par le moulin. Enfin, si l'on prend le 3<sup>ème</sup> chiffre, les 100 humains effectuent réellement un travail mécanique de 20 kWh/jour, et le moulin toujours 20 kWh/jour. Il s'agit cette fois-ci d'un véritable bilan sur l'*énergie mécanique produite* : la moitié de l'énergie mécanique produite dans cette micro-société l'est par le moulin. La deuxième méthode nous paraît intéressante de deux points de vue : d'une part, le chiffre de la puissance potentiellement produite par un humain (0,4 kWh/jour) est fiable et invariant dans le temps, alors que celui du travail mécanique réellement fourni (ici pris à 0,2 kWh/jour) peut varier suivant les époques et est surtout complètement arbitraire, car nous n'avons pas trouvé de données à ce sujet; d'autre part, le fait que la deuxième méthode conduise à un résultat sur la force de travail, et donc sur le nombre d'humains que remplace un système mécanique donné, nous paraît assez intéressant. Il faut néanmoins garder en tête que cette deuxième méthode *sous-estime la part du moulin dans l'énergie mécanique réellement produite* : dans notre exemple, la roue remplace 1/3 des humains qui seraient nécessaires, mais prend en charge plus de la moitié de l'énergie mécanique. En effet, la roue, si elle était remplacée, devrait l'être par des humains effectuant un travail mécanique intense et continu (tourner une meule, remonter des seaux, taper avec un marteau, ...), et non pas par des humains ayant une activité physique moyenne.

	<b>Humains</b>	<b>Animaux</b>	<b>Bois</b>	<b>Moulins à eau</b>	<b>Moulins à vent</b>	<b>Total</b>
<b>Romains</b>	3 (24-40%)	1,1-2,3 (14-19%)	3,5-7 (46-57%)	?	0 (0%)	7,6-12,3 (100%)
<b>Fin XVIII<sup>ème</sup> siècle</b>	3 (12,7%)	4 (16,9%)	12,5 (chauffage) et 4,5 (industrie) (70%)	0,07 (0,3%)	0,02 (0,1%)	23,6 (100%)

**Tableau 3 : Bilan de l'énergie utilisée par la société dans l'Empire Romain et à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, en kWh/jour/hab. Les chiffres sont ceux de l'énergie totale consommée. La part des moulins à eau dans le bilan énergétique romain est inconnue.**

La discussion que nous venons d'avoir sur le travail humain s'applique également au travail animal, avec néanmoins une légère nuance. Il existe toujours une large différence entre l'énergie consommée par un animal et la force mécanique produite. Par exemple, le cheval consomme 20 kWh/jour de fourrage, et produit une puissance de 1 ch, soit 750 W ; si l'on suppose un travail 7 heures par jour cela conduit à une énergie mécanique maximale d'environ 5 kWh/jour. Comme pour les humains, l'énergie mécanique réellement produite devrait prendre en compte les vieux chevaux, les poulains et les périodes sans activité. Néanmoins, contrairement aux humains, il n'est pas nécessaire de prendre en compte une activité physique réduite, car les animaux de trait (chevaux, bœufs) étaient toujours utilisés dans le but de produire une énergie mécanique continue (transport, travail de la terre, exhaure, élévation d'eau, broyage, etc). En l'absence de véritable donnée chiffrée à ce sujet, nous avons arbitrairement fixé l'énergie mécanique réellement produite par les chevaux à la moitié de l'énergie maximale, soit 2,5 kWh/jour.

Nous allons dans un premier temps présenter les données de répartition énergétique chez les Romains. Ces données sont résumées dans le Tableau 3. Il s'agit des chiffres de l'énergie nécessaire pour faire fonctionner la société, quelle que soit sa nature. La part des animaux y est estimée entre 1,1 et 2,3 kWh/jour/hab, et celle du bois entre 3,5 et 7 kWh/jour/hab (Palamina, 2011). Dans le cas de l'Empire Romain, devrait en principe s'y ajouter la part des moulins à eau. Néanmoins, leur importance n'est connue que de manière relative, et pas du tout absolue. Si l'on considère les découvertes archéologiques comme représentatives de l'importance relative des moulins, on sait que leur nombre a considérablement augmenté à partir du I<sup>er</sup> Siècle, culminé au III<sup>ème</sup> siècle, avant de s'effondrer. Les valeurs atteintes au III<sup>ème</sup> siècle n'auraient a priori été atteintes de nouveau que bien après le X<sup>ème</sup> Siècle en Europe (Wilson, 2007). Néanmoins les valeurs absolues restent inconnues, et ne permettent donc pas de faire une estimation de l'importance de l'énergie hydraulique dans l'empire romain.

On peut obtenir une image plus précise de la répartition énergétique dans un système traditionnel typique en étudiant en Europe la période précédant la révolution industrielle, à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Nous avons déjà mentionné plus haut les chiffres de la consommation en bois de chauffage, qui étaient compris suivant les régions entre 5 et 50 kWh/jour/hab, avec une moyenne à 12,5 kWh/jour/hab, valeur à laquelle il convient d'ajouter 4,5 kWh/jour/hab pour l'industrie. Concernant le travail animal, on trouvait à cette époque environ un équivalent-cheval<sup>196</sup> pour 5 habitants, soit une consommation de 4 kWh/hab. Concernant les moulins à eau, on en trouvait environ 1 pour 250-300 habitants, soit une puissance mécanique moyenne de 0,07 kWh/jour/hab. Il y avait moins d'un moulin à vent pour dix moulins à eau, et on estime que la puissance éolienne totale constituait entre 1/4 et 1/3 de celle de la puissance hydraulique; nous retiendrons donc le chiffre de 0,02 kWh/jour/hab (Kander, 2013).

Les chiffres du Tableau 3 nous montrent que, dans l'Empire Romain comme à la fin du Moyen Âge, les besoins en énergie thermique sous forme de bois étaient largement prépondérants, suivis par les besoins en nourriture pour les animaux et les humains. L'énergie mécanique directe (moulins) ne représentait qu'une infime partie (moins de 0.5% au total) du bilan énergétique total. Néanmoins, comme nous l'avons déjà discuté plus haut, ce bilan ne permet pas d'avoir une bonne vision de la répartition concernant l'énergie mécanique. Nous présentons donc un bilan plus spécifique de l'énergie mécanique dans le Tableau 4. La première ligne du tableau est calculée à partir des valeurs d'énergie maximale pouvant être fournie par les animaux et les humains. La deuxième ligne utilise les valeurs arbitraires d'énergie réellement fournie par les animaux et les humains. En l'absence d'estimation fiable de ces valeurs, nous avons pris les valeurs déjà présentées plus haut, fixées arbitrairement à la moitié de la valeur maximale. Cette deuxième ligne doit donc être considérée comme ayant une valeur uniquement illustrative.

	<b>Humains</b>	<b>Animaux</b>	<b>Moulins à eau</b>	<b>Moulins à vent</b>	<b>Total</b>
<b>Energie maximale</b>	0,4 (27%)	1 (67%)	0,07 (4.5%)	0,02 (1.5%)	1,49 (100%)
<b>Energie réelle</b>	0,2 (25,3%)	0,5 (63,3%)	0,07 (8,8%)	0,02 (2,5%)	0,79 (100%)

**Tableau 4 : Bilan de l'énergie mécanique, en kWh/jour/hab à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Dans la ligne « énergie maximale », l'énergie maximale pouvant être fournie par les animaux et les humains est utilisée. Dans la ligne « énergie réelle », l'énergie réellement fournie par les humains et les animaux est utilisée, et fixée arbitrairement à la moitié de la valeur maximale.**

<sup>196</sup> Dans les estimations d'énergie mécaniques fournis par les animaux, les ânes et les bœufs sont convertis en nombre de chevaux qui consommeraient la même quantité de nourriture.

On constate dans tous les cas la très large prépondérance du travail mécanique humain et animal dans le travail total, loin devant celui fourni par les moulins. Ce tableau illustre de manière plus précise le fait déjà évoqué de la prépondérance des moulins à eau sur les moulins à vent, et celle du travail animal sur le travail humain. De ces chiffres, il y a deux conclusions possibles, sans que nous puissions, en l'état actuel, savoir laquelle est la plus juste :

- Les moulins n'ont effectivement joué qu'un faible rôle dans les sociétés pré-industrielles, constituant une source d'énergie complémentaires, mais non prépondérante.

- Les moulins ont joué un rôle bien plus important que ce que les chiffres de ce tableau amènent à conclure. Ceci pourrait s'expliquer si le nombre des moulins à eau et/ou à vent ont été largement sous-estimés par les historiens et/ou si l'énergie mécanique réellement fournie par les humains ou les animaux est bien inférieure à leur énergie maximale. Il faudrait ainsi que l'énergie mécanique réellement fournie par les animaux ou les humains soit 15 fois inférieure à leur valeur maximale pour que les moulins à eau et à vent aient une contribution équivalente à celle des animaux et des humains.

#### D. La transition vers le système énergétique moderne

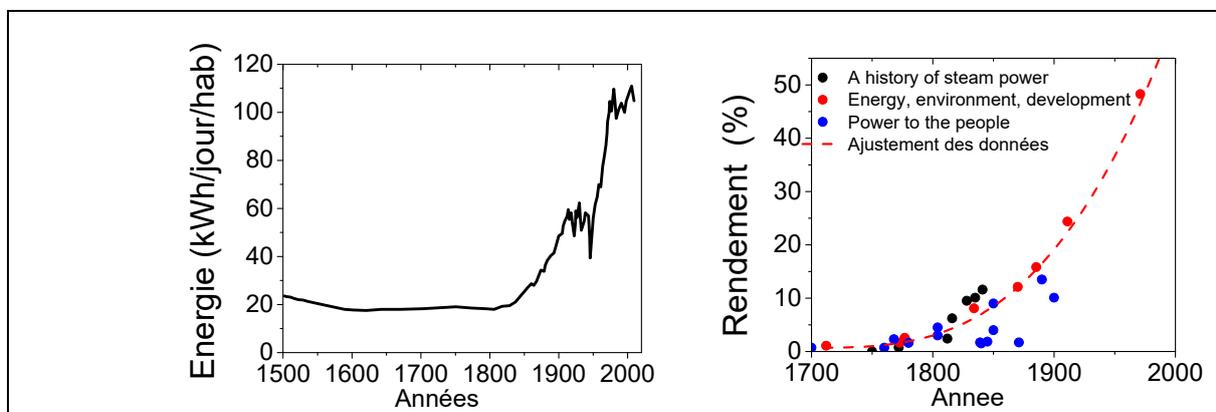
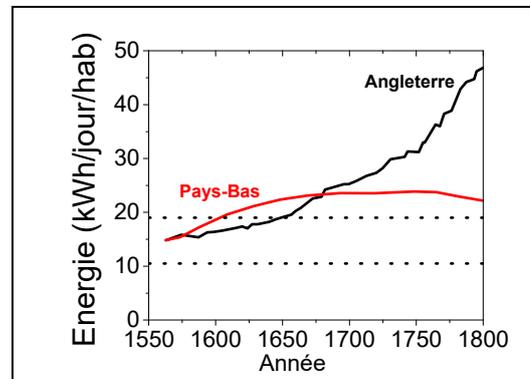


Figure 2 : (a) Consommation énergétique européenne moyenne. Données issues de Kander (2013). (b) Evolution du rendement de la machine à vapeur. Les noms des livres dont sont issues les données sont indiqués dans la légende : « Power to the people » (Kander, 2013) ; « Energy, environment, development » (Wrigley, 2010) ; « A history of steam power » (Lovland, 2007). L'ajustement des données a été fait avec une loi de puissance.

La transition ayant eu lieu entre le système énergétique traditionnel et le système énergétique moderne est illustrée par le graphe de la Figure 2(a), qui montre la consommation énergétique moyenne en Europe depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle jusqu'à nos jours. On y constate une augmentation d'un facteur environ 6 entre l'énergie consommée par habitant avant la révolution industrielle et celle consommée dans les années 2000. Cette croissance comporte plusieurs phases distinctes : i) une première croissance lors de la révolution industrielle, ii) un plateau lors des deux guerres mondiales, iii) la plus forte croissance dans la période de l'après-guerre, due à la consommation de pétrole due et à l'utilisation de l'électricité, qui facilite la consommation énergétique, iv) une croissance plus molle mais toujours significative depuis les années 70. Ces données ne doivent pas nous faire oublier qu'en parallèle avec cette augmentation d'énergie consommée, un grand nombre de processus d'utilisation de l'énergie ont vu leur rendement augmenter fortement, et que l'énergie « utile » a donc environ augmenté d'un facteur bien supérieur. Cette augmentation du rendement est illustrée Figure 2(b) par un graphe de l'évolution du rendement de conversion entre énergie thermique et énergie mécanique dans les machines à vapeur, et nous verrons d'autres exemples plus loin.



**Figure 3 : (a) Consommation énergétique en Angleterre et aux Pays-Bas. Les deux lignes horizontales donnent la gamme dans laquelle se trouve vraisemblablement la moyenne européenne. Données issues de Kandler (2013).**

Le graphe de la Figure 3 illustre plus précisément la période 1550-1800 pour deux pays d'intérêt: les Pays-Bas et l'Angleterre. Ces deux pays ont pour particularité d'être les deux seuls pays européens à avoir eu bien avant la révolution industrielle une part significative de leur consommation énergétique due aux énergies fossiles. Les Pays-Bas commencèrent à utiliser la tourbe de manière significative au cours du XVI<sup>ème</sup> siècle, avec une forte augmentation durant le XVII<sup>ème</sup> siècle (Kander, 2013). Il est ainsi estimé que la consommation de tourbe correspondait à environ 10 kWh/jour/hab, ce qui est très significatif, au vu d'une moyenne européenne située à 20 kWh/jour/hab (Wrigley, 2010). Ceci n'est sans doute pas étranger au fait que les Pays-Bas ont connu au XVII<sup>ème</sup> siècle un âge d'or, durant lequel ils dominaient l'économie européenne, et exportaient de nombreux produits nécessitant une énergie thermique significative pour leur production : bière, brique, sel, sucre, verre, etc (de Vries, 1997). L'utilisation d'énergie fossile ainsi qu'une économie dynamique n'ont cependant pas été suffisantes pour induire la révolution industrielle : la consommation énergétique des Pays-Bas subit une stagnation, puis une

diminution à partir du milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle. En Angleterre, la consommation énergétique dépassa celle des Pays-Bas vers la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle et, contrairement à eux, augmenta ensuite de manière continue.

	<b>Humain</b>	<b>Animal</b>	<b>Bois</b>	<b>Eolien</b>	<b>Hydraulique</b>	<b>Charbon</b>	<b>Total</b>
<b>1560</b>	3,2 (22,8%)	4,6 (32,4%)	4,7 (33%)	0,04 (0,3%)	0,12 (0,8%)	1,5 (10,6%)	14,2 (100%)
<b>1600</b>	3,3 (24,5%)	3,7 (27,5%)	3,7 (27,9%)	0,06 (0,5%)	0,12 (0,9%)	2,5 (18,6%)	13,3 (100%)
<b>1650</b>	3,5 (22,3%)	3,7 (23,7%)	3 (19%)	0,11 (0,7%)	0,12 (0,8%)	5,2 (33,5%)	15,6 (100%)
<b>1700</b>	3,7 (16,2%)	4,4 (19,4%)	3 (13,3%)	0,18 (0,8%)	0,13 (0,6%)	11,3 (49,7%)	22,8 (100%)
<b>1750</b>	3,2 (12,9%)	3,7 (14,5%)	2,5 (9,7%)	0,3 (1,2%)	0,14 (0,6%)	15,3 (61%)	25,1 (100%)
<b>1800</b>	3,8 (8,1%)	3,1 (6,6%)	1,7 (3,6%)	1,1 (2,4%)	0,1 (0,2%)	37,2 (79%)	47,2 (100%)
<b>1850</b>	3,1 (3,7%)	2,3 (2,7%)	0,1 (0,1%)	1,1 (1,3%)	0,08 (0,1%)	78,1 (92%)	84,9 (100%)

**Tableau 5 : Energie utilisée en Angleterre, en kWh/jour/hab, ainsi que leur pourcentage du total, indiqué entre parenthèses. L'année indiquée correspond à la première année de la décennie durant laquelle l'estimation a été faite. L'énergie éolienne prend en compte le transport maritime à voile. Les données brutes sont issues de Wrigley (2010), et ont été converties en kWh/jour/hab.**

Nous allons maintenant détailler un peu plus la transition entre le système traditionnel et le système moderne, et notamment l'évolution des différentes sources d'énergie, en nous appuyant sur l'exemple de deux pays. Le premier est l'Angleterre, pays de naissance de la révolution industrielle. Le deuxième est la France, représentative des pays européens qui se sont engagés dans la révolution industrielle peu après l'Angleterre (Allemagne, Belgique, Pays-Bas).

Concernant l'Angleterre, nous nous sommes basés sur les estimations de E.A. Wrigley (Wrigley, 2010), présentées dans le Tableau 5. Entre 1550 et 1850, toutes les énergies traditionnelles stagnent ou déclinent en valeur absolue, et déclinent en valeur relative. La seule exception est l'éolien, qui augmente en valeur absolue et en valeur relative jusqu'en 1800. Ceci est dû à la croissance de la marine anglaise à voile, qui est notamment utilisée pour l'exportation du charbon. Il faut néanmoins noter que la très forte augmentation en 1800 est, d'après P. Warde, probablement en partie due à une sous-estimation de l'importance de la marine avant cette date (Warde, 2007). On constate également la part non négligeable du charbon dès 1560, ce qui constitue, comme nous l'avons déjà mentionné, une spécificité de la Grande-Bretagne en Europe.

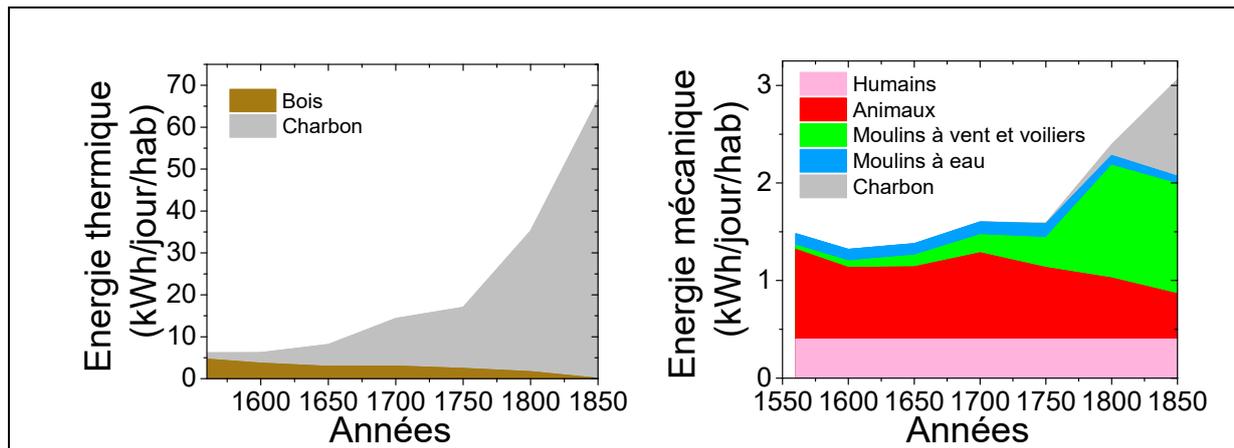
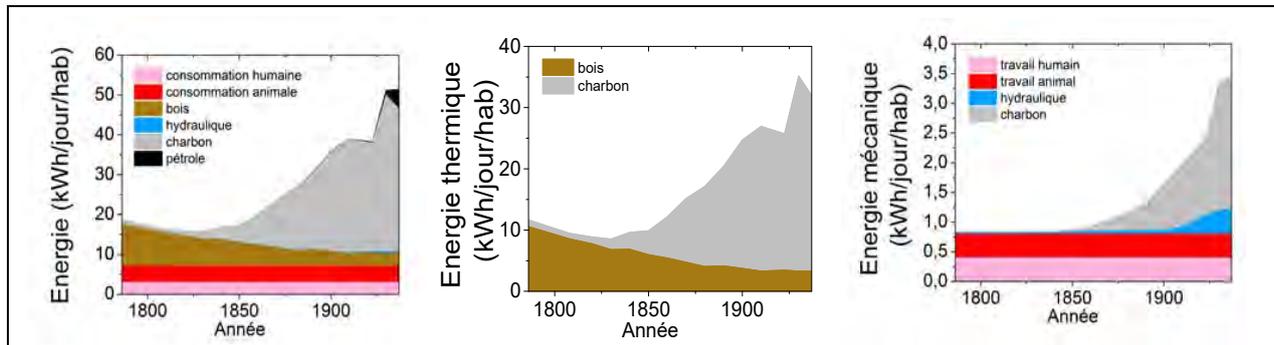


Figure 4 : (a) Evolution de l'origine de l'énergie thermique en Angleterre. (b) Evolution de l'origine de l'énergie mécanique en Angleterre. Pour le travail humain et animal, le chiffre de l'énergie mécanique maximale pouvant être produite a été utilisé. Dans les légendes, les catégories situées en-dessous de la pile sont listées en premier.

Comme précédemment, il nous est apparu intéressant de présenter séparément les données relatives à l'énergie thermique et à l'énergie mécanique. Pour cela, l'apparition de la machine à vapeur rend les choses un peu plus compliquées que dans le système traditionnel, puisque le charbon a été utilisé pour un usage thermique (en métallurgie, par exemple) ou un usage mécanique (dans les machines à vapeur). Afin de différencier les deux, nous avons utilisé les données de C. J. Minard (Minard, 1866) qui montrent que, dans les années 1850 en Angleterre, environ 15% du charbon était utilisé dans les machines à vapeur. Nous avons fait croître linéairement cette valeur depuis 0% en 1700, date à laquelle la machine à vapeur n'existait pas. Ensuite, nous avons utilisé la courbe présentée Figure 2(b) afin de convertir la part de charbon utilisée dans les machines à vapeur en énergie mécanique. Pour le travail humain et animal, nous avons utilisé les valeurs maximales d'énergie mécanique pouvant être produites, ce qui surestime leur part, comme discuté plus haut. Les résultats de l'évolution de l'énergie thermique et mécanique sont présentés Figure 4. On constate que la révolution industrielle s'est finalement faite en deux étapes bien distinctes. *La première phase de la révolution est très précoce et consiste en une révolution thermique* : dès 1700, le charbon est devenu largement prépondérant par rapport au bois. Les économistes décrivent cette première phase comme une phase qui « économise l'espace » : en effet, il n'y a plus besoin d'utiliser de forêt (et donc de l'espace) pour obtenir de l'énergie thermique. La deuxième phase de la révolution, plus tardive, est une révolution mécanique : à partir de 1850, la part de l'énergie mécanique produite par les machines devint très significative, avant de s'envoler dans les décennies qui suivirent. Ce n'est en définitive que lorsque les machines à vapeur eurent atteint un rendement significatif, notamment par l'invention des machines à haute-pression, que cette deuxième phase put avoir lieu. Les économistes la décrivent comme celle qui économise le travail : il y a

cette fois-ci besoin de beaucoup moins de travail humain dans le processus de production.



**Figure 5 : Evolution de la structure énergétique en France. Consommation énergétique (a) totale (b) thermique (c) mécanique en France. Pour le travail humain et animal, le chiffre de l'énergie mécanique maximale pouvant être produite a été utilisé. Dans les légendes, les catégories situées en-dessous de la pile sont listées en premier.**

Le cas de la France est présenté Figure 5, la méthodologie appliquée pour obtenir les données étant décrite en note de bas de page<sup>197</sup>. Comme pour l'Angleterre précédemment, nous avons séparé la part de charbon utilisée pour l'énergie mécanique et pour l'énergie thermique. L'énergie éolienne n'est pas représentée : elle vaut environ 10% de l'énergie hydraulique en 1830 et est négligeable après 1860. Comme dans la plupart des autres pays européens, on constate la faible contribution du charbon à la consommation énergétique avant la révolution industrielle. C'est à partir de 1830 que le charbon commence à jouer un rôle significatif en France, représentant alors plus de 10% de la consommation énergétique totale. C'est également lors de cette décennie que la part de charbon dans la consommation énergétique totale a dépassé 10% en Allemagne et aux Pays-Bas. En Italie, Suède, Portugal, et Espagne, pays qui se sont engagés plus tardivement dans une économie basée sur le charbon, c'est dans la période 1870-1880 que cette part fut atteinte (Kander, 2013). Dans les données concernant l'énergie thermique et l'énergie mécanique, on n'observe pas les deux phases successives qui étaient visibles dans les données anglaises :

<sup>197</sup> Méthodologie : Nous avons utilisé les chiffres de T. J. Markovitch pour la production de bois de chauffage et de charbon (Markovitch, 1966). Les chiffres de la production de charbon ont été augmentés pour prendre en compte le fait que les importations en charbon de la France constituaient environ 30% de sa consommation totale (Mines Paris Tech). Les estimations de S. Benoit ont été utilisées pour l'énergie éolienne (Benoit, 2006). Pour l'énergie hydraulique, nous avons utilisé les résultats de la Statistique Générales de la France pour la période après 1860 (Huber, 1932), et l'estimation de S. Benoit en 1830 (Benoit, 2006). Faute d'estimations pour la période précédant 1830, nous avons choisi de garder la puissance hydraulique par habitant constante entre 1786 et 1830. Concernant la part de travail animal, faute d'estimations plus précises, nous avons conservé les chiffres de la moyenne européenne à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle (un équivalent-cheval pour 5 habitants), en supposant qu'elle était restée constante durant la période étudiée. Pour séparer la part de charbon utilisée pour l'énergie mécanique et pour l'énergie thermique, nous avons procédé comme suit : sachant que les premières machines à vapeur ont été installées en France vers le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, que leur part dans la consommation de charbon était d'environ 10% en 1847, 15% en 1891 et de 17% en 1900 (Mines Paris Tech), nous avons fait croître la part de charbon utilisée pour les machines à vapeur d'environ 1% par décennie.

la part du charbon dans l'énergie thermique et dans l'énergie mécanique semble plutôt augmenter de manière similaire. Une fois élaboré en deux phases en Angleterre, il semble que le modèle anglais se soit donc plutôt exporté comme un tout.

Le graphe de la Figure 5(c) illustre bien le rôle non négligeable de l'énergie hydraulique dans l'industrialisation française, un aspect qui est bien reconnu du point de vue historique. Ceci est d'autant plus vrai si l'on prend en considération le fait que l'énergie mécanique présentée dans la Figure 5(c) est calculée à partir de la consommation de charbon française, dont les 2/3 étaient destinés à des applications de transport (locomotives principalement, mais également dans les bateaux à vapeur). La part de l'hydraulique dans les usines s'en trouve donc d'autant plus augmentée.

Afin de préciser un peu plus cet aspect, le Tableau 6 présente l'évolution de la puissance totale des machines hydrauliques et à vapeur dans les usines françaises. On y constate que, pendant toute la phase d'industrialisation, la part de l'hydraulique a toujours représenté au minimum le quart de la puissance totale dans les usines françaises, et que la puissance hydraulique a été décuplée en 50 ans. Nous allons voir avec plus de détails dans les pages suivantes les aspects techniques liés à ce développement, mais on peut noter dès à présent que la forte augmentation de la puissance hydraulique entre 1906 et 1926 correspond à l'avènement de l'hydroélectricité, et donc à l'installation dans les usines d'alternateurs et de moteurs électriques.

	Hydraulique (MW)	Vapeur (MW)	Hydraulique (%)
1861-1865	226	122	65
1901	393	1320	23
1906	580	1954	23
1926	2082	5513	27

**Tableau 6 : Puissance totale des machines hydrauliques ou à vapeur installées dans les usines françaises. La dernière colonne donne la part de l'hydraulique dans la puissance totale (Huber, 1932).**

### **E. L'évolution du système traditionnel pendant et après la révolution industrielle**

Pendant et après la révolution industrielle, les sources d'énergie du système traditionnel ont continué à être utilisées. Leur importance dans les différents pays fut variable, et dépendait en partie des ressources disponibles en bois, charbon, et en ressources hydrauliques et éoliennes. En Grande-Bretagne, la déforestation avait été massive, les ressources hydrauliques étaient relativement faibles dans une grande partie du pays, et le charbon abondant. On aurait donc pu s'attendre à un abandon très rapide du système traditionnel. Pourtant, comme nous le verrons plus bas, avant la disparition du système énergétique traditionnel, plusieurs améliorations des moulins à eau et à vent

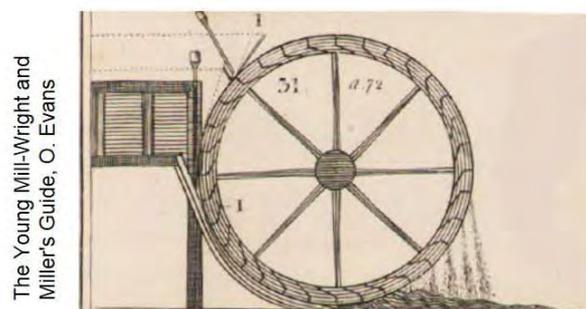
eurent pour origine l'Angleterre. Un des facteurs permettant de l'expliquer est le décalage temporel entre l'augmentation de l'énergie thermique et celle de l'énergie mécanique que nous avons observé plus haut. L'Angleterre s'est retrouvée au cours du XVIII<sup>ème</sup> siècle avec de forts besoins en énergie mécanique pour soutenir sa production industrielle en pleine croissance, et avec une forte production de métal, qui lui a permis de fabriquer des moulins métalliques à faible coût. Notons également que, une fois un moulin construit, il fournit une énergie mécanique gratuite, et que cet aspect les rend compétitifs, comme l'illustre leur maintien jusqu'à nos jours pour la production d'électricité, par exemple. Dans les autres pays, le maintien ou non du système traditionnel peut généralement s'expliquer par la présence de certaines ressources : la Suède a conservé une industrie métallurgique basée sur le bois pendant très longtemps ; l'Italie, la Suisse et la Suède, possédant de nombreuses zones montagneuses, ont utilisé de manière importante l'énergie hydraulique ; l'Allemagne, richement dotée en charbon, a plutôt suivi un modèle proche du modèle anglais ; la France, à la fois dotée en charbon et en énergie hydraulique, a suivi une voie intermédiaire.

Il existe d'autres facteurs, en plus de ceux liés aux ressources naturelles, permettant d'expliquer le maintien de l'eau et du bois lors des premières phases d'industrialisation. D'une part, en dépit du fait que tout le processus de sidérurgie pouvait être basé sur le coke, le bois continuait à donner du fer et des aciers de qualité supérieure. Ainsi, en France, dans certains groupes industriels, la sidérurgie basée sur le coke était réservée aux rails ou fers de construction, alors que les productions haut de gamme se faisaient dans des usines fonctionnant au bois. Ces produits étaient par exemple les bandages et essieux pour les chemins de fer, et le fer destiné à la production de fils télégraphiques par les tréfileries. Ceci était également vrai dans d'autres domaines tels que les faïenceries ou cristalleries. En Europe, l'exemple le plus flagrant de maintien d'une sidérurgie au bois est la Suède, puisque le fer et l'acier, réputés pour leur qualité, y furent fabriqués en utilisant exclusivement du bois jusqu'en 1930 (Benoit, 2006). D'autre part, les rendements dans l'usage thermique du bois augmentèrent légèrement. Ainsi, la technique de la distillation du bois en vase clos, qui permettait de récolter le gaz produit lors de la fabrication du charbon de bois se développa, et on se mit également à utiliser d'autres sortes de bois (bois vert, bois séchés, bois torréfiés) en complément du charbon de bois pour tenter d'améliorer les rendements, en évitant ainsi la perte de carbone inévitable lors de la fabrication du charbon de bois. On peut également noter une meilleure efficacité énergétique dans le procédé de production de fonte au bois, et l'adaptation du procédé de puddlage à l'utilisation de bois comme combustible (Benoit, 2006).

Un deuxième facteur de maintien du système technique traditionnel fut l'amélioration des techniques hydrauliques et éoliennes. Quelques physiciens et mathématiciens se sont penchés sur le problème de l'optimisation des moulins,

et ont permis de mieux comprendre les critères permettant d'y parvenir. Concernant les moulins à vent, les calculs ont notamment permis de montrer que l'empirisme ayant guidé la fabrication des moulins hollandais avait conduit à des formes d'ailes optimales ! Ce n'était par contre pas le cas pour les moulins à eau, et c'est dans ce domaine que les augmentations de rendement furent les plus spectaculaires.

Commençons donc par nous pencher sur ces derniers. Avant la révolution industrielle, la roue la plus courante était munie de pales entraînées par le courant. Cette roue dite « en dessous » avait un rendement compris entre 10 et 20%, et délivrait une puissance de quelques kW. En Angleterre au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, apparurent les roues de côté, les **roues de poitrine** ou les roues en dessus, dans lesquelles l'eau était admise dans la roue en hauteur : approximativement le 1/4 de la hauteur pour la roue de côté, les 3/4 pour celle de poitrine, et de la hauteur de la roue pour celle en dessus. Dans les roues de poitrine ou de dessus, les aubes étaient remplacées par des augets<sup>198</sup>. Dans toutes ces roues, le poids de l'eau était utilisé, ce qui induisait une nette augmentation de rendement. C'est ainsi que les roues de côté pouvaient atteindre un rendement de 40%, et les roues de poitrine ou par-dessus un rendement de 80% (Benoit, 2006). Le diamètre des roues fut parfois augmenté, pouvant atteindre jusqu'à 20 m, ainsi que leur largeur. A partir de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, on se mit à utiliser des arbres, puis des pales, en fer, et le bois fut progressivement abandonné dans les décennies qui suivirent, notamment dans les roues à augets. Ces nouvelles roues permettaient d'atteindre des valeurs de puissance inégalées dans les roues traditionnelles, pouvant aisément atteindre plusieurs dizaines de kW. Dans les années 1840s, aux Etats-Unis, la plus grande roue de poitrine du pays alimentait un centre textile, et délivrait une puissance de 280 kW (Hunter, 1964).

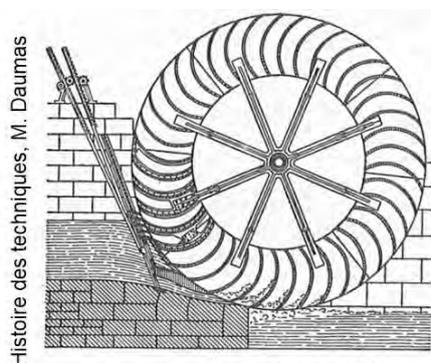


Roue de poitrine, 1834

## roues de poitrine

<sup>198</sup> Les augets sont des pales inclinées qui font office de réservoirs et contiennent l'eau lors de la rotation de la roue.

En France, les roues avec une faible hauteur de chute<sup>199</sup> étaient les plus courantes dans les zones industrielles. Les roues en-dessous, les plus adaptées à ces contraintes, furent perfectionnées au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle en jouant sur le profil des aubes, leur densité, leur orientation et le profil des coursiers<sup>200</sup>. C'est ainsi que la **roue Poncelet**, entièrement métallique, permit d'atteindre un rendement de 50% lors de sa première construction en 1824, puis 70% en 1870. Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la **roue Sagebien**, particulièrement adaptée aux très faibles hauteurs de chute, mais pouvant également fonctionner si le niveau était plus haut, permit d'atteindre des rendements de plus de 90%. Cette roue fut très répandue en France dans les zones à faible dénivelé, pour alimenter en énergie mécanique les moulins à grains (Benoit, 2006).



Histoire des techniques, M. Daumas

*Roue de Poncelet, 1824*

## **roue Poncelet**



Le monde des moulins, n°1, 2002, J. P. H. Azéma

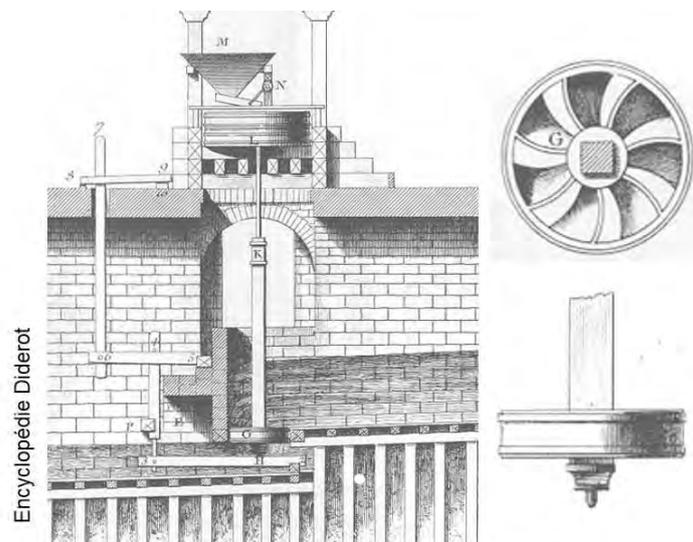
*Roue Sagebien en Charentes*

## **roue Sagebien**

<sup>199</sup> La hauteur de chute est la différence de niveau d'eau entre l'entrée et la sortie de la roue.

<sup>200</sup> Le coursier est le nom donné au canal construit pour amener l'eau au moulin.

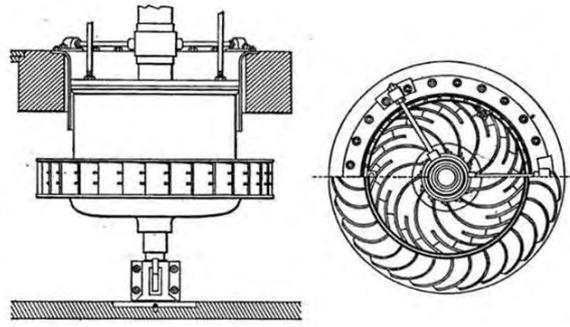
A peu près à la même époque, les premières turbines <sup>201</sup> furent développées, dont l'intérêt était multiple. D'abord, pour une puissance donnée, elles étaient beaucoup plus compactes que les roues traditionnelles. Elles permettaient également d'atteindre des vitesses de rotation bien plus élevées que les roues, ce qui était avantageux pour l'alimentation en énergie mécanique des industries. Elles permettaient d'exploiter les zones montagneuses peu propices à l'installation de roues, et leur fonctionnement était moins soumis que ces dernières aux variations saisonnières de hauteur d'eau ou au gel. Enfin, elles présentaient des valeurs de rendement très élevées. L'ancêtre de la turbine est la **roue à cuve**, dont la présence est attestée dans le Sud de la France au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle (Forest de Bélidor, 1787 ; National Academy of Sciences, 1977). Elle présentait comme similarité avec sa future descendante d'être une roue horizontale – l'arrivée de l'eau se faisant perpendiculairement à l'axe de la roue –, ce qui dispensait de l'utilisation d'engrenages. Elle était également noyée dans l'eau, et présentait une vitesse de rotation plus élevée qu'une roue traditionnelle. Néanmoins, son rendement n'excédait pas 20%. Si des avancées significatives vers le développement de la turbine eurent lieu au cours du XVIII<sup>ème</sup> siècle, la première turbine à avoir été vraiment utilisée industriellement est la **turbine Fourneyron**, dont le premier exemplaire fut fabriqué en France en 1827. L'eau y pénétrait par un conduit central, rentrait dans un distributeur fixe, et était éjectée radialement par une couronne en rotation. Entièrement métallique, elle présentait un rendement pouvant atteindre 70%. En 1837, Fourneyron fit construire pour alimenter une usine allemande une turbine dont la puissance dépassait 70 kW (Hunter, 1964 ; Lewis, 2014 ; Benoit, 2006).



*Roue à cuve, Toulouse, XIX<sup>ème</sup> siècle.*

## roue à cuve

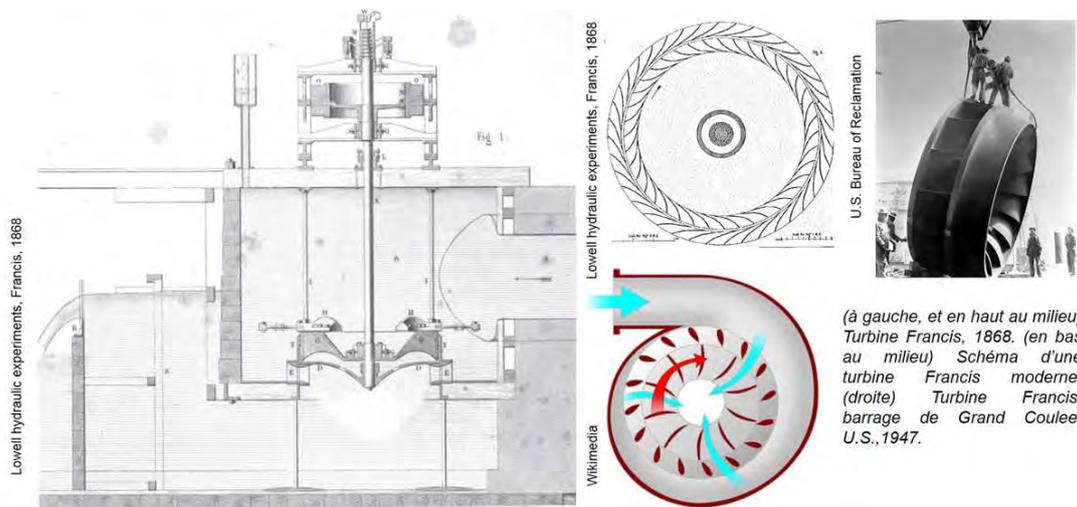
<sup>201</sup> Dans les turbines, l'eau pénètre à l'intérieur de la roue, et des ailettes permettent de propulser l'eau dans le sens opposé au sens de rotation de la roue, ajoutant à la force d'entraînement due au choc de l'eau sur les ailettes une force due au principe d'action/réaction.



## turbine Fourneyron

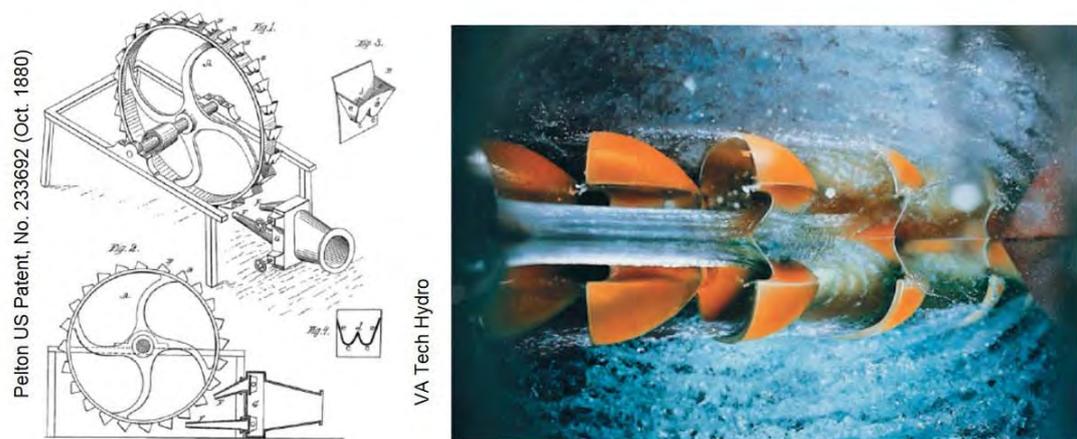
*Turbine Fourneyron, 1844.*

Ces résultats stimulèrent une recherche intense sur les turbines, en particulier en France et aux Etats-Unis. Dans les décennies qui suivirent, différents types de turbines furent développées, adaptées à différentes hauteurs de chute et différents débits, l'objectif étant de récupérer le maximum d'énergie dans les différentes conditions possibles, de pallier à certains inconvénients de la turbine Fourneyron, et de faire en sorte que les rendements exceptionnels des turbines soient conservés même lorsqu'elle ne fonctionnaient pas au maximum de leur puissance, afin d'économiser l'eau. Parmi les différents modèles qui furent développés, on peut noter les **turbines Francis**, fabriquées pour la première fois au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle aux Etats-Unis. A l'opposé des turbines Fourneyron, l'eau rentrait par la périphérie de la turbine et repartait par son centre, procurant des avantages en termes de rendement (environ 80%), de contrôle et de longévité (Lewis, 2014). A peu près à la même période, la **roue tangentielle Pelton**, adaptée à de très fortes hauteurs de chutes et de faibles débits, fut mise au point. Dans cette turbine, un jet puissant était projeté sur les godets d'une roue. Ces derniers avaient une forme spéciale qui permettait de renvoyer l'eau dans le sens opposé au sens de projection, permettant d'atteindre là encore de forts rendements. Les grandes roues Pelton pouvaient atteindre une puissance de 750 kW. Dans un renversement historique assez intéressant, dans les années 1890, de nombreuses machines à vapeur furent remplacées par des roues Pelton dans les principales régions minières de Californie, région particulièrement bien adaptée à ce type de roues, et où le charbon était cher (Hunter, 1964 ; Lewis, 2014).



(à gauche, et en haut au milieu) Turbine Francis, 1868. (en bas au milieu) Schéma d'une turbine Francis moderne. (droite) Turbine Francis, barrage de Grand Coulee, U.S., 1947.

## turbines Francis



(gauche) Roues tangentielles Pelton, 1880. (droite) Roue Pelton moderne.

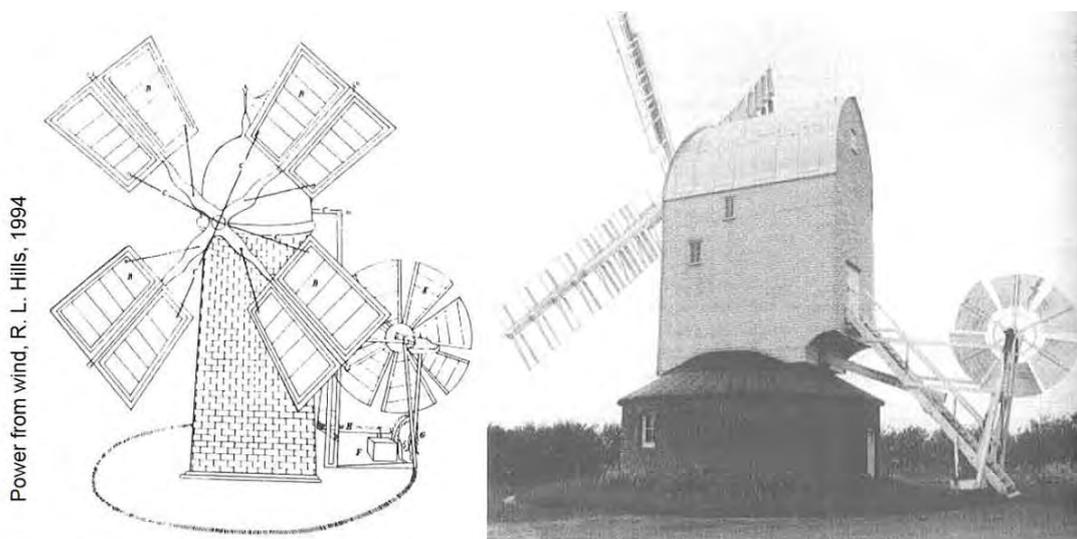
## roue tangentielle Pelton

Les roues et turbines que nous venons de mentionner ont été largement utilisées pour alimenter les nouvelles usines issues de la révolution industrielle, particulièrement gourmandes en énergie mécanique : métiers à tisser et à filer, laminoirs, tréfileries, forges, papeteries mécaniques, minoteries<sup>202</sup>. Les principes généraux utilisés durant cette période pour la fabrication de turbines sont toujours d'actualité puisque certaines d'entre elles, même si leur architecture a été améliorée depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, sont toujours utilisées dans les usines hydroélectriques. Ainsi, les turbines contribuèrent au maintien, au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, de la force hydromécanique comme source d'énergie pour une industrie en pleine expansion, et préparait le terrain et les infrastructures pour l'avènement de l'hydroélectricité, qui débuta à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (Benoit, 2006).

<sup>202</sup> La minoterie est un grand établissement dans laquelle est fabriquée la farine.

En ce qui concerne les moulins à vent, nous avons déjà mentionné que la forme de leur aile était déjà relativement optimisée, compte tenu des contraintes inhérentes à l'usage du bois. Un certain potentiel d'amélioration se situait au niveau des engrenages, qui avaient un rendement de l'ordre de 40%. La fonte, puis le fer, commencèrent à être introduits dans les mécanismes des moulins vers la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Egalement, à cette époque, plusieurs ingénieurs cherchèrent à réguler de manière automatique les moulins. On cherchait ainsi à orienter automatiquement le moulin face au vent, et à limiter la vitesse de rotation en cas de fort vent (Hills, 1994).

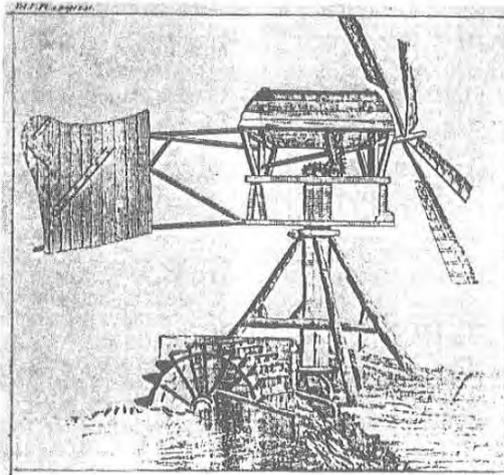
La première de ces tentatives fut le **moulinet d'orientation**, système déjà mentionné dans le Chapitre II, qui fut mis au point en Angleterre par Edmund Lee en 1745. Ce système nécessitait des engrenages robustes, et donc en fonte. Il fut utilisé dans certaines régions d'Angleterre, et en Europe, mais restait dangereux en cas de tempête, et ne fut donc pas très répandu. Une autre méthode, plus simple mais plutôt adaptée à des moulins de petite taille, consistait à rajouter une **queue** à l'arrière du moulin, à la manière des girouettes, ce qui forçait les ailes à rester face au vent. On en voit un exemple dans le dessin d'un moulin anglais de 1770 destiné au drainage.



(gauche) Figure du brevet d'Edmund Lee, illustrant le principe de son moulinet d'orientation, UK, 1745. (droite) Moulin à Aythorpe Roding, Essex, UK.

## **moulinet d'orientation**

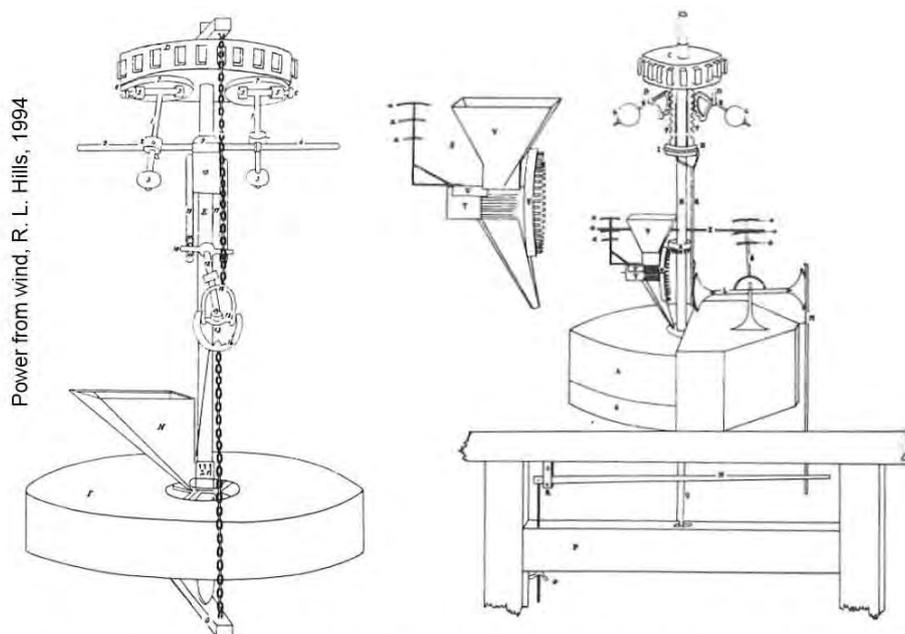
Power from wind, R. L. Hills, 1994



## queue

*Moulin destiné au drainage, et disposant qu'une queue permettant de l'orienter face au vent, UK, 1770.*

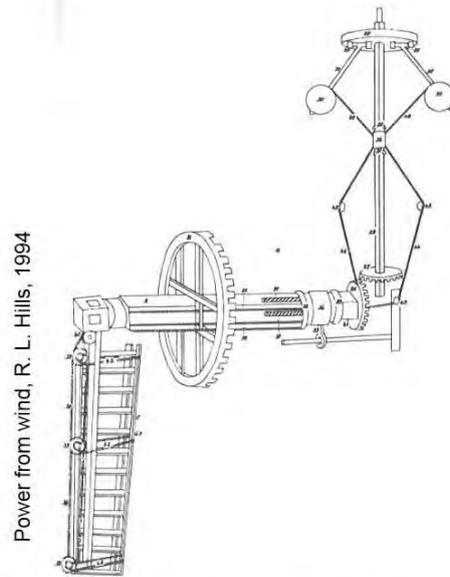
Pour pallier au problème des tempêtes, et pour varier la prise au vent des ailes ou la charge du moulin en fonction de l'intensité du vent, les fabricants tentèrent de nombreuses méthodes. Une première est l'ajustement automatique de l'écartement entre les meules ou de la vitesse d'écoulement du grain, ce qui permettait à la fois de varier la charge du moulin, mais également de produire une farine de qualité, et d'éviter qu'elle ne brûle en cas de vent fort ou d'alimentation insuffisante en grain. C'est dans les années 1780s que les premiers systèmes permettant de régler l'écartement des meules furent mis au point. Les plus efficaces étaient les systèmes basés sur les **régulateurs à boules**, qui utilisent la force centrifuge exercée sur deux poids pour agir sur différents systèmes de transmission de force. C'est ainsi qu'à la fin de cette décennie, un mécanisme permettant de lever la meule était mis au point par T. Mead, et un autre permettant de réguler l'arrivée de grain et de lever la meule par S. Hooper. Les régulateurs à boules furent, au cours du siècle qui suivit, largement utilisés pour le contrôle des moulins, mais furent également utilisés peu de temps après leur invention par Watt pour moduler l'entrée de vapeur dans ses machines.



(gauche) Utilisation du régulateur à boules par T. Mead pour varier l'écartement entre les meules, 1787. (droite) Utilisation du régulateur à boules par S. Hooper pour varier l'écartement entre les meules et la débit de grain.

## régulateurs à boules

Les premières tentatives de régulation automatique des ailes datent de 1744. Pendant plusieurs décennies, différentes méthodes ont été tentées, basées sur l'utilisation de poids, de régulateurs à boules, de leviers, de cordes, d'engrenages, etc, afin d'arriver à contrôler l'angle que font les ailes par rapport au vent, ou à contrôler la couverture des ailes. Ces différentes tentatives ne semblent pas avoir été couronnées d'un grand succès, ou tout au moins très répandues (Hills, 1994). Le système de régulation développé par T. Mead en 1787 est néanmoins une intéressante illustration des systèmes qui ont été essayés. Basé sur un régulateur à boules, il permettait de **contrôler la surface des ailes** couverte par un tissu, en fonction de la vitesse du vent. Un système astucieux et qui a, lui, été très répandu, est celui des **ailes à jalousies**, développé par A. Meikle. Il consiste à recouvrir les ailes de planches de bois pivotantes, à la manière des stores vénitiens. Les planches de bois pouvaient tourner sur elles-mêmes en cas de fort vent, et n'offraient alors plus de prise à ce dernier. En cas de vent modéré, les planches étaient maintenues face au vent à l'aide d'un gros ressort. Ces ailes ne délivraient cependant pas autant de puissance qu'une aile normale, et le réglage des ressorts devait être effectué manuellement en début de journée par le meunier. Ce mécanisme fut modifié en 1804 par W. Cubbit, afin de permettre au meunier de **régler manuellement l'ouverture** des ailes sans avoir à arrêter le moulin, tout en continuant à offrir la possibilité d'un réglage automatique. Ceci lui permettait également de facilement lancer ou arrêter son moulin. L'installation sur un même moulin d'un moulinet d'orientation et d'un système de régulation permettait donc au meunier de s'affranchir complètement de tout travail de surveillance du moulin.



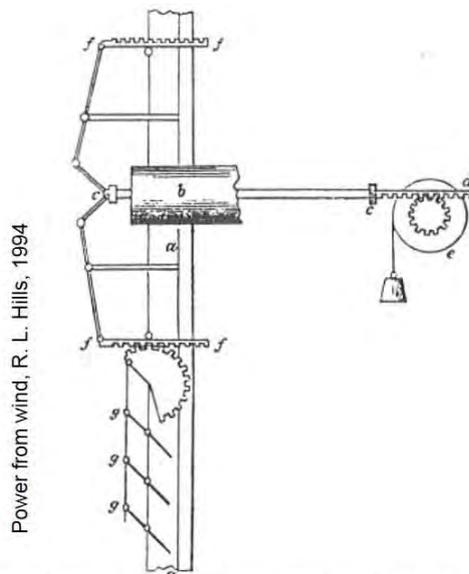
*Système de régulation développé par T. Mead, permettant de varier la couverture des ailes, 1787.*

### **contrôler la surface des ailes**



*Ailes à jalousie sur le moulin d'Outwood (UK). Le moulin fut construit en 1665, et ce type d'ailes fut installé plus tard.*

### **ailes à jalousies**



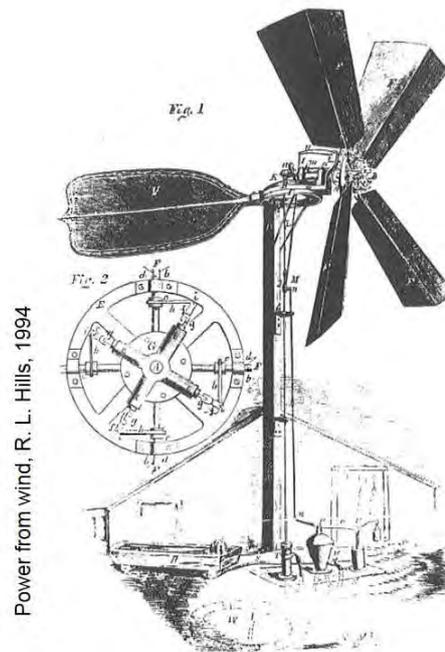
*Système de régulation développé par W. Cubbit, permettant de varier automatiquement ou manuellement la couverture des ailes, 1807.*

## **régler manuellement l'ouverture**

Cette automatisation ne permettait pas seulement d'éviter des accidents et d'augmenter la productivité du meunier, elle permit également d'installer les ailes plus en hauteur, afin de profiter des vents plus intenses soufflant lorsqu'on s'éloigne du sol, puisque le meunier n'avait plus à avoir accès aux ailes pour régler leur couverture. Les mesures de puissance qui ont été effectuées sur des moulins hollandais utilisés pour le drainage de l'eau dans les années 1930s montrent que ces derniers délivraient une puissance d'environ 40 kW (Hills, 1994). C'est donc probablement la puissance maximale qui fut atteinte par des moulins de forme traditionnelle avec des ailes de bois au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle. C'est également dans les années 1930s que la puissance des moulins de type hollandais put être augmentée de nouveau, en construisant des ailes métalliques, et dont le profil avait été optimisé en suivant les principes utilisés en aéronautique. Les puissances atteintes alors étaient de presque 100 kW (De Decker, 2010).

Aux Etats-Unis, la recherche d'automatisation des moulins fut très dynamique. Cela était motivé par la nécessité d'élever de l'eau depuis les nappes souterraines dans les grandes plaines américaines, vastes zones peu arrosées mais ventées. Dans ces larges étendues, il était particulièrement intéressant pour un fermier d'avoir de nombreux moulins autonomes. Les premiers systèmes de régulation, développés par D. Halladay en 1854, permettaient de **changer l'angle des ailes** à l'aide d'un régulateur à boules, et de maintenir le moulin face au vent à l'aide d'une queue. En France, ces nouveaux moulins furent commercialisés sous le nom d'éolienne, et c'est donc ce mot que nous utiliserons désormais pour les désigner. Quelques années plus tard, une nouvelle approche permettant de gérer le problème de l'orientation de l'éolienne face au

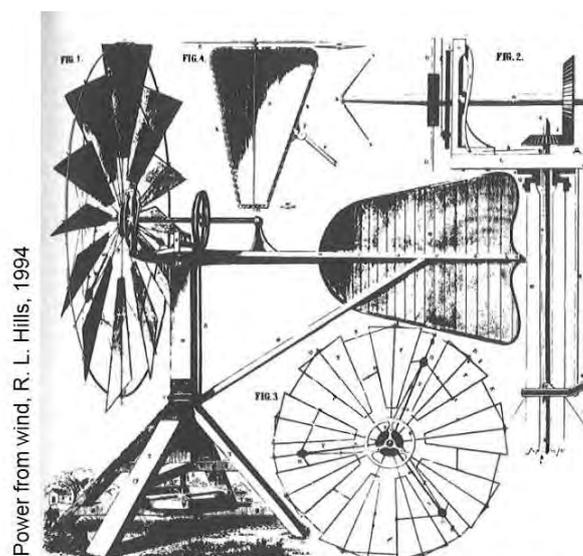
vent fut développée. Elle consistait à ajouter aux éoliennes une ou deux **plaques faisant face au vent**, et qui permettaient de faire pivoter la tête du moulin sous l'effet de ce dernier. En cas de vent violent, l'axe de rotation des ailes se retrouvait donc perpendiculaire à l'axe du vent, stoppant ainsi la rotation des ailes. Ce système de régulation devint le système standard pour toutes les éoliennes fabriquées aux Etats-Unis.



Power from wind, R. L. Hills, 1994

*Eolienne développée par D. Halladay, permettant de maintenir les ailes faces au vent, et d'ajuster leur angle en fonction de la vitesse du vent, 1854.*

**changer l'angle des ailes**



Power from wind, R. L. Hills, 1994

*Dessin de F. G. Johnson illustrant les pales placées en anneau, 1885.*

**plaques faisant face au vent**

Les premières éoliennes américaines fabriquées dans les années 1850 étaient en bois, et disposaient de quatre ailes, comme dans les moulins de type hollandais. Dans les années qui suivirent, les éoliennes furent dotées de rotors comprenant un très **grand nombre de pales** disposées en anneau. Ce choix s'explique par le fait qu'augmenter le nombre de pales permet de faire tourner l'éolienne à partir d'un vent plus faible, même si la puissance obtenue en cas de vent intense est moindre qu'avec un nombre de pales réduit. En fait, élever de l'eau pour l'agriculture ou un usage domestique ne nécessite pas nécessairement une forte puissance, contrairement aux cas où l'on cherche à faire tourner des meules, par exemple. Ces éoliennes, qui avaient donc une puissance plus faible que les moulins traditionnels hollandais, devinrent entièrement métalliques à partir de 1870, et leur dissémination fut très importante, non seulement aux États-Unis, mais également en Europe.



Power from wind, R. L. Hills, 1994

*Photographie d'une éolienne ayant servi à remonter de l'eau et convertie plus tard en générateur d'électricité. On y voit un système à deux pales permettant d'orienter l'éolienne face au vent (photographie de 1992).*

### **grand nombre de pales**

Après la révolution industrielle, les moulins à vent et les éoliennes continuèrent à être utilisés pour leurs applications traditionnelles du Moyen Âge : élévation de l'eau pour drainer des terres, broyage de grains pour faire de la farine ou de l'huile, broyage de pierres, sciage du bois, forge, assouplissement du cuir, broyage de plantes pour l'obtention de fibres à papier ou de fibres à tisser. Les différentes évolutions que nous avons mentionnées plus haut ont permis aux moulins à vent de rester, dans certains cas, compétitifs par rapport à la machine à vapeur. Pour que cela soit le cas, il fallait que l'application puisse

tolérer l'intermittence inhérente à l'énergie éolienne, que les zones d'installation potentielle soient ventées, que l'énergie hydraulique y soit rare, et le charbon cher. Quand ça n'était pas le cas, les industriels cherchaient plutôt à s'installer sur des sites hydrauliques ou investissaient dans des machines à vapeur. Quelques applications se sont donc maintenues tardivement mais, à partir de 1850, de nombreux moulins à vent n'ont pas été reconstruits, réparés ou ont cessés d'être utilisés. Parmi les utilisations qui se sont maintenues, on peut citer le drainage des terres en Hollande, qui resta principalement éolien jusqu'en 1900 ; en Angleterre, pays de la révolution industrielle, le dernier grand moulin à maïs fut construit en 1892, et celui qui est resté en activité le plus tardivement s'arrêta en 1957 (Hills, 1994). En revanche, certaines utilisations toléraient peu l'intermittence : c'est ainsi que l'exhaure dans les mines fut très rarement confiée à l'énergie éolienne, que l'alimentation en énergie mécanique des filatures en Angleterre ne le fut jamais, et que de nombreuses industries se sont rapidement tournées vers les fortes puissances continues des machines à vapeur ou des turbines. Ainsi, en Hollande, pays-roi de cette énergie, les machines à vapeur ne représentaient qu'une faible fraction de la puissance industrielle en 1850, mais leur part grandit rapidement jusqu'à atteindre 81% en 1904. A cette époque, les moulins ne produisaient plus que 11% de la puissance industrielle.

En conclusion, les sources d'énergies traditionnelles ne se sont pas éteintes complètement après la révolution industrielle. L'essor drastique de la métallurgie et la possibilité apportée par la révolution industrielle de fabriquer des machines imposantes, d'utiliser des engrenages métalliques et de fabriquer des mécanismes de régulation astucieux, ont permis d'utiliser les énergies éoliennes et hydrauliques de manière plus intensive que lors de la période précédente. Notamment, en Angleterre, dans les premiers stades de la révolution industrielle, alors que l'essor métallurgique avait eu lieu, mais pas encore l'essor mécanique dû à la machine à vapeur, ces sources d'énergie mécanique intenses furent grandement appréciées. Egalement, aux Etats-Unis, vaste pays effectuant sa révolution industrielle alors qu'il était peu densément peuplé, le transport de charbon coûtait cher; énergies éoliennes et hydrauliques y furent développées et exploitées à leur maximum.

Néanmoins, comme dans le système énergétique traditionnel, l'utilisation de l'énergie éolienne dans la période industrielle est toujours restée en deçà de celle de l'énergie hydraulique, pour deux raisons principales. D'une part, son défaut intrinsèque ne peut être résolu : une forte intermittence sur des échelles de l'ordre de la minute, de l'heure et du jour, qui donnait du fil à retordre aux meuniers, et en donne désormais aux ingénieurs chargés de concevoir les réseaux électriques adaptées aux énergies renouvelables. D'autre part, il n'a pas été trouvé de moyens de concentrer l'énergie du vent plus qu'elle ne l'était déjà dans les moulins à vent traditionnels. La voie qui fut suivie pour augmenter la puissance des éoliennes fut donc la seule *a priori* possible : les construire plus hautes pour capter des vents plus forts, augmenter la surface des ailes, et

optimiser le profil de ces dernières pour gagner un peu de rendement. En revanche, dans le cas de l'énergie hydraulique, en plus de l'augmentation significative des rendements, augmenter les hauteurs de chute et utiliser des conduites forcées permet de concentrer toute l'énergie de pesanteur de l'eau sur une petite surface, et a donc permis d'obtenir des valeurs de puissance très importantes. Nous avons ainsi vu que, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, la puissance de turbines hydrauliques pouvait frôler le MW, alors que les plus grands moulins à vent n'avaient une puissance que de 40 kW. Les turbines ont donc permis d'alimenter en énergie mécanique, puis électrique, de nombreuses usines au cours du XIX<sup>ème</sup> et du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette différence de puissance entre ces deux sources d'énergie renouvelable s'est maintenue jusqu'à nos jours : 700 MW actuellement pour une turbine du barrage des Trois-Gorges en Chine, et 8 MW pour la plus grande éolienne, qui a des pales de 144 m de diamètre.

## CONCLUSION

L'objectif de ce premier tome était de dresser un panorama technique de sociétés qui nous ont précédés et qui vivaient sans utiliser de ressources fossiles ou presque. La consommation énergétique de ces sociétés est restée pendant des millénaires essentiellement limitée par les faibles rendements depuis l'énergie solaire de la photosynthèse d'une part, et par l'absence de possibilités techniques de capter de manière massive les énergies solaires, hydrauliques et éoliennes, d'autre part. La consommation énergétique par habitant est restée dans la gamme 5-20 kWh/jour/habitant, et provenait essentiellement de la combustion de bois pour le chauffage et de la consommation alimentaire des humains et des animaux domestiques. La part des énergies éolienne et hydraulique dans l'énergie mécanique est restée faible, cette dernière étant principalement fournie par les animaux et les humains. Avant la révolution industrielle à proprement parler, les sociétés utilisant le plus d'énergie étaient celles qui brulaient de la tourbe ou du charbon, leur procurant généralement un avantage économique, illustré par l'âge d'or néerlandais ou la domination britannique au XVII<sup>ème</sup> siècle. S'affranchir de la barrière de la photosynthèse et capter plus efficacement les énergies hydraulique et éolienne n'a été possible qu'en utilisant massivement du charbon. Ainsi, même si plusieurs historiens, comme A. Mann ou S. Benoit, ont réévalué avec raison l'importance de la force hydraulique par rapport à la machine à vapeur dans les débuts de la révolution industrielle (Mann, 2017 ; Benoit 2006), cela ne doit pas nous faire oublier que, comme l'a fait remarquer l'historien J.-B. Fressoz avant nous : sans charbon, pas d'industrie sidérurgique et donc pas de turbines ou d'éoliennes métalliques (Fressoz, 2018). Le charbon reste donc la base ayant permis la fabrication de machines énergétiques fournissant de fortes puissances d'énergies renouvelables.

Ainsi, comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre IV.D, la révolution industrielle est, en premier lieu, une *révolution thermique*, qui n'a toujours pas pris fin. En effet, si l'on cherchait à voir s'il serait possible de construire, aujourd'hui, un panneau photovoltaïque ou une éolienne moderne « sans charbon et sans pétrole », on s'arracherait inévitablement les cheveux, tant les sources d'énergie thermique concentrée que constituent les énergies fossiles interviennent à chaque maillon des procédés industriels : extraction des matières premières, transformation, transport. Mais cela n'est que la continuité d'un processus démarré lors de la révolution industrielle : ainsi, imaginer comment le développement d'une société industrielle – fut-elle basée sur l'énergie hydraulique – aurait été possible (ou serait possible) sans énergie fossile paraît insoluble, la production de bois paraissant insuffisante pour construire les infrastructures nécessaires. A titre personnel, ce constat et les réflexions menées lors de l'écriture de ce premier tome nous ont conduit à participer au développement dans notre laboratoire d'une nouvelle thématique de recherche,

autour de la « métallurgie solaire » : serait-il possible que la première étape de la révolution industrielle, cette « révolution thermique », puisse être basée sur l'utilisation directe de l'énergie solaire, s'affranchissant à la fois de la barrière de la photosynthèse et de l'utilisation des énergies fossiles ? Rien de moins sûr, car l'utilisation directe de l'énergie solaire pose des problèmes spécifiques, tels que le gigantisme des installations et l'intermittence. Mais notre travail de chercheur reste néanmoins d'explorer des pistes, même si elles nous paraissent potentiellement illusoire.

Ce livre est également l'occasion de constater la grande ingéniosité qui fut développée par nos prédécesseurs dans l'utilisation de ressources renouvelables. Même si un certain nombre de ces techniques étaient probablement connues de la lectrice ou du lecteur, nous espérons qu'elle ou il aura pris un intérêt à cette lecture. Pour notre part, nous avons particulièrement apprécié lors de la rédaction de cet ouvrage de découvrir les moulins-bateaux, la transmission flottante du bois à grande échelle, la transmission de l'énergie mécanique par des arbres de transmission en bois, les dragues à cuillères, les métiers à tisser et les rouets, les techniques antiques de fabrication de soude, potasse, et salpêtre, les constructions mécaniques en bois visant à pomper, broyer, battre, frapper, et enfin l'histoire des turbines. La question de savoir si les sociétés utilisant ces techniques, bien qu'utilisant principalement des ressources renouvelables (mais pas que, pensons à l'extraction minière), étaient pérennes et auraient pu perdurer pendant des millénaires se pose. Une première interrogation est liée à la déforestation, qui a eu lieu tout au long de l'histoire de l'humanité, mais on peut aussi s'interroger, entre autres, sur la dégradation des sols agricoles ou l'épuisement des ressources minérales. Nous reviendrons sur ces questions lors du deuxième tome.

Les évolutions techniques qui ont eu lieu autour de la révolution industrielle et après laissent apparaître une problématique complexe : les connaissances scientifiques « fondamentales » ainsi que la complexité des outils et machines ont crû de manière parallèle à la croissance de la consommation énergétique, illustrant un lien très fort entre les trois. Nos connaissances scientifiques, fussent-elles qualifiées de « fondamentales », ne naissent jamais hors-sol, et ne peuvent émerger sans un système technique à la complexité suffisante pour permettre la découverte. Ainsi, on ne peut isoler l'acide formique sans un appareillage permettant de distiller des fourmis, découvrir l'aluminium sans piles électriques ou les globules rouges sans microscope. Et l'utilisation dans la vie courante de ces découvertes nécessite le plus souvent un système technique d'une complexité similaire à celle de la découverte : par exemple, la fabrication à grande échelle de bougies stéariques (voir Chapitre II.G) nécessite une production importante d'acide sulfurique, des cuves en plomb, des presses hydrauliques chauffantes, reproduction à une échelle plus importante de l'appareillage et des produits de laboratoires de chimie de l'époque. A ce sujet, il est intéressant de constater que le fameux « retour à la bougie » utilisé comme

épouvantail par les partisans de la croissance économique sans limite est très loin d'être un retour à l'âge de pierre, et que la bougie stéarique faisait déjà partie d'une société dont la complexité et l'appareillage technique étaient alimentés par les énergies fossiles, posant la question de sa pérennité sur le long terme.

En contrepoint de ce qui vient d'être dit, un certain nombre de découvertes, bien qu'apparues historiquement après la révolution industrielle, pourraient aisément être utilisées dans une société sans énergie fossile. Par exemple, dans le domaine de la médecine, le savon pour l'hygiène et l'alcool comme désinfectant chirurgical pourraient être produits et utilisés dans une société dotée d'un système technique peu complexe et sobre en énergie. C'est probablement également le cas de certaines connaissances fondamentales apparues dans les deux derniers siècles dans le domaine de l'agriculture, qui concernent les besoins des plantes ou les origines et traitement de certaines maladies. Mais il existe tout un ensemble de techniques dont le statut paraît difficile à déterminer sans étude poussée ni méthodologie adaptée. Par exemple, une de nos interrogations concerne l'électricité, son utilité pour répondre à des besoins fondamentaux et sa possible incorporation dans un système technique pérenne : nous ne savons pas si une société « sans charbon et sans pétrole » utilisant l'électricité pourrait être pérenne sur plusieurs millénaires. Et nous souhaiterions que la réponse à une telle question puisse se faire de manière scientifique, et non pas idéologique ou en utilisant uniquement notre intuition.

Partant de ces considérations, nous nous sommes à plusieurs reprises interrogés en découvrant ces sociétés préindustrielles à consommation énergétique réduite : telle connaissance scientifique moderne y serait-elle « utile », et si oui à quoi ? Tel outil moderne pourrait-il être fabriqué dans une société qui n'utiliserait pas de charbon ? Si l'on « rejouait » la période 1600-1900 avec nos connaissances scientifiques modernes, mais sans utiliser de charbon ou de tourbe, quels systèmes techniques pourraient être construits ? Et avec quelle pérennité ? Voici un ensemble de questions qui sont au cœur de nos réflexions sur les *systèmes techniques pérennes* et qui, nous l'espérons, susciteront des réflexions chez nos lectrices et lecteurs, et auxquelles nous tenterons d'apporter des éléments de réponse dans nos ouvrages suivants.

## **Remerciements.**

Je tiens à remercier Paolo Malanima pour m'avoir conseillé et envoyé de nombreux articles, et pour avoir confirmé la validité de certaines de mes analyses sur l'énergie dans l'Europe préindustrielle ; Andrew Wilson pour m'avoir fourni des informations sur l'importance des moulins à eau sous l'Empire Romain, et fait découvrir les travaux archéologiques montrant la présence de brocards hydrauliques dans cette période ; Laurent Richard pour m'avoir fait découvrir le livre de David JC MacKay ; Sébastien Lachaize pour nos nombreuses discussions sur la pérennité de notre société et les low-tech ; Marina Soulagnet pour ses relectures et ses soutien ; mes parents pour leur constante affection.

# BIBLIOGRAPHIE

## Sources génériques

« Histoire générale des Techniques », sous la direction de M. Daumas, Presses Universitaires de France, 5 tomes publiés entre 1962 et 1979.

« Une histoire des techniques », B. Jacomy, Le seuil, 2015.

## Chapitre I : du Néolithique à la fin de l'antiquité

### A. Agriculture et élevage

« Impromptu sur la séquence des Pointes du Paléolithique supérieur », A. Cheynier, Bulletin de la Société préhistorique de France, tome 55, n°3-4, pp. 190-205, 1958.

[http://www.persee.fr/doc/bspf\\_0249-7638\\_1958\\_num\\_55\\_3\\_3646](http://www.persee.fr/doc/bspf_0249-7638_1958_num_55_3_3646)

« Sur les Pointes de Sagaies fourchues » E. Passemard, Bulletin de la Société préhistorique de France, tome 14, n°2, pp. 119-126, 1917.

[http://www.persee.fr/doc/bspf\\_0249-7638\\_1917\\_num\\_14\\_2\\_7501](http://www.persee.fr/doc/bspf_0249-7638_1917_num_14_2_7501)

« Le propulseur et l'arc chez les chasseurs préhistoriques. Techniques et démographies comparées ». J.-G. Rozoy. Paléo, n°4, pp. 175-193, 1992.

[http://www.persee.fr/doc/pal\\_1145-3370\\_1992\\_num\\_4\\_1\\_1202](http://www.persee.fr/doc/pal_1145-3370_1992_num_4_1_1202)

« Les dix millénaires oubliés qui ont fait l'histoire », Jean-Paul Demoule, Fayard 2017.

“Machines, Power and the Ancient Economy”, A. Wilson, The Journal of Roman Studies

Vol. 92, pp. 1-32, 2002. Disponible en ligne.

« À propos du pressoir à huile : de l'archéologie industrielle à l'histoire », M.-C. Amouretti, G. Comet, C. Ney, J.-L. Paillet. Mélanges de l'Ecole française de Rome. Antiquité, tome 96, n°1, pp. 379-421, 1984.

[http://www.persee.fr/doc/mefr\\_0223-5102\\_1984\\_num\\_96\\_1\\_1411](http://www.persee.fr/doc/mefr_0223-5102_1984_num_96_1_1411)

### B. L'eau

“Historical and Technical Notes on Aqueducts from Prehistoric to Medieval Times”, G. De Feo, A. N. Angelakis, G. P. Antoniou, F. El-Gohary, B. Haut, C. W. Passchier and X. Y. Zheng, Water 5, 1996-2025, 2013. Disponible en ligne

“Annexe. Joint de canalisation en bois », J. Chalavoux, R. Chalavoux R., Revue archéologique de Narbonnaise, tome 4, pp.174-175, 1971.

[http://www.persee.fr/doc/ran\\_0557-7705\\_1971\\_num\\_4\\_1\\_1598](http://www.persee.fr/doc/ran_0557-7705_1971_num_4_1_1598)

« La canalisation sous-fluviale d'Arles à Trinquetaille », A. Cochet, Gallia, tome 50, pp. 205-222, 1993.

[http://www.persee.fr/doc/galia\\_0016-4119\\_1993\\_num\\_50\\_1\\_2938](http://www.persee.fr/doc/galia_0016-4119_1993_num_50_1_2938)

### **C. Céramique et verrerie**

« Histoire du verre –L'antiquité », F. Slitine, Massin (Paris), 2005

### **D. Extraction minière et métallurgie**

“Bir Umm Fawakhir: Insights into Ancient Egyptian Mining”, C. Meyer, Journal of Minerals, Metals & Materials Society 49, 64, 1997.

« Mines, Antiquité gréco-romaine », C. Domergue, Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 22 juillet 2016.

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/mines-antiquite-greco-romaine/>

« L'eau dans les mines d'or romaines du Nord-Ouest de l'Espagne. », C. Domergue. In: L'Homme et l'Eau en Méditerranée et au Proche-Orient. III. L'eau dans les techniques. Séminaire de recherche 1981-1982. Lyon : Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux. pp. 109-119, 1986.

[https://www.persee.fr/doc/mom\\_0766-0510\\_1986\\_sem\\_11\\_1\\_2075](https://www.persee.fr/doc/mom_0766-0510_1986_sem_11_1_2075)

” Machines, Power and the Ancient Economy”, A. Wilson, The Journal of Roman Studies

Vol. 92, pp. 1-32, 2002. Disponible en ligne.

« Voyage au monde du métal : invention et aventures », P. Routhier, Belin (Paris), 1999

« Copper Working Technologies, Contexts of Use, and Social Complexity in the Eastern Woodlands of Native North America”, K. L. Ehrhardt, J World Prehist 22, 213–235, 2009.

« Des laitiers obtenus dans un bas-fourneau ? Études chimique et minéralogique des scories du site d'Oulches (Indre) » C. Mahé-Le Carlier, N. Dieudonné-Glad, A.Ploquin

Revue d'Archéométrie, n°22, pp. 91-101, 1998

[http://www.persee.fr/doc/arsci\\_0399-1237\\_1998\\_num\\_22\\_1\\_965](http://www.persee.fr/doc/arsci_0399-1237_1998_num_22_1_965)

« Modelling Possibilities of the Medieval Bloomery Process under Laboratory Conditions”, A. Thiele, L. Dévényi, Materials Science Forum, 729, 290-295, 2013.

“L'orichalque et le laiton », R. Halleux. L'antiquité classique, Tome 42, fasc. 1, pp. 64-81, 1973.

[http://www.persee.fr/doc/antiq\\_0770-2817\\_1973\\_num\\_42\\_1\\_1693](http://www.persee.fr/doc/antiq_0770-2817_1973_num_42_1_1693)

“Ancient Roman Valves”, Wayne F. Lorenz, Valve Magazine, 19 Feb 2013, [www.valvemagazine.com](http://www.valvemagazine.com)

“Principles of Soldering”, G. Humpston, D. M. Jacobson, The Materials Information Society, Ohio, 2004. Consultable en partie en ligne.

## **E. La chimie**

« Penser la matière. Une histoire des chimistes et de la chimie », J. Baudet, Vuibert (Paris), 2004

« An Ancient Cleanser: Soap Production and Use in Antiquity », K. L. Konkol and S. C. Rasmussen, In Chemical Technology in Antiquity; Rasmussen; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2015

« Collection des alchimistes grecs », M. Bertherlot, 1887. Consultable en ligne.

« Vitriol in the history of chemistry », V. Karpenko et J. A. Norris, Chem. Listy 97, 997, 2002. Consultable en ligne

“The 100 most important chemical compounds : a reference guide”, R. L. Myers, ABC-CLIO, 2007.

## **F. Vêtements, tissus et cordage**

« La complémentarité des outillages lithiques et osseux via la tracéologie : problématiques et méthodologie. », A. Lompré, S. Negroni. A. Coudenneau & T. Lachenal. Première table ronde des jeunes chercheurs en archéologie de la MMSH, 2006, Aix-en-Provence, France. MMSH - Ecole Doctorale, Aix-en-Provence, pp.1-12, 2006. Consultable en ligne

“Confirmation of the world’s oldest woven garment: the Tarkhan Dress”, A. Stevenson et M. W. Dee, Antiquity, Project Gallery article - Issue 349, February 2016.

<http://antiquity.ac.uk/projgall/stevenson349>

“The book of looms”, E. Broudy, University Press of New England, Hanover, 1979. Consultable en partie en ligne

## **G. L’habitat**

P. Guéneau, archéomaquettiste, [www.histoire-en-maquette.com](http://www.histoire-en-maquette.com), 2009.

« De la maison à la ville dans l’Orient ancien : la maison et son mobilier », C. Michel.

France. Archéologies et Sciences de l'Antiquité, pp.157, Cahier des Thèmes transversaux ArScAn, ISSN 1953-5120, 2015. Disponible en ligne.

« A stone relief of a water-powered stone saw at Hierapolis, Phrygia », K. Grewe et P. Kessener. *Énergie hydraulique et machines élévatrices d'eau dans l'Antiquité*, pp. 227-234, Naples, 2007

« La Mécanique de Vitruve », P. Fleury Textes scientifiques et techniques latins vol. 734, Presses universitaires de Caen, 1993. Voir également les textes et reconstitution du même auteur sur <http://www.unicaen.fr/ersam/>

“Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China—A review”, Z. Zhuang, Y. Li, B. Chen, J. Guo, *Energy and Buildings* 41, 111–119, 2009.

## H. Feu et lumière

« Préhistoire expérimentale, le feu », J. Collina-Girard, 2005. <http://www.futura-sciences.com> (consulté février 2016).

« Bronze Fire Lighting Mirror with a Pattern of Tiger and Bird », écrit par le musée Henan (Chine), <http://english.chnmus.net> (consulté février 2016)

« Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes, volume 4-L'art de l'éclairage », L. Figuier, Furne Jouvett et Cie (Paris), 1870. Disponible en ligne.

## I. Transports et communications

« Les harnais des attelages gallo-romains. Nouvelles études expérimentales », D. Franck, *Histoire & Sociétés Rurales*, Vol. 43, p. 7-44, 2015  
[www.cairn.info/revue-histoire-et-societes-rurales-2015-1-page-7.htm](http://www.cairn.info/revue-histoire-et-societes-rurales-2015-1-page-7.htm)

« La faiblesse de l'attelage antique : la fin d'un mythe ? ». G. Raepsaet, *L'antiquité classique*, Tome 48, fasc. 1, pp.171-176, 1979.  
[http://www.persee.fr/doc/antiq\\_0770-2817\\_1979\\_num\\_48\\_1\\_1938](http://www.persee.fr/doc/antiq_0770-2817_1979_num_48_1_1938)

« L'attelage dans l'Antiquité. Le prestige d'une erreur scientifique », M.-C. Amouretti. In: *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 46 année, n° 1, pp. 219-232, 1991.  
[http://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1991\\_num\\_46\\_1\\_278939](http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1991_num_46_1_278939)

« Habitats lacustres néolithiques et perception du temps ». P. Pétrequin, *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 102, n°4, pp. 789-802, 2005.  
[http://www.persee.fr/doc/bspf\\_0249-7638\\_2005\\_num\\_102\\_4\\_13182](http://www.persee.fr/doc/bspf_0249-7638_2005_num_102_4_13182)

“Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them”, M. G. Lay, James E. Vance, Rutgers University Press, 1992

“World’s Oldest Paved Road Found in Egypt”, New-York Times, J. N. Wilford, 8 Mai 1994

« Les voies romaines en Gaule ». Grenier A., Mélanges d’archéologie et d’histoire, tome 53, pp. 5-24, 1936.

[http://www.persee.fr/doc/mefr\\_0223-4874\\_1936\\_num\\_53\\_1\\_7267](http://www.persee.fr/doc/mefr_0223-4874_1936_num_53_1_7267)

“So what did the Romans do for us? Archaeologists find cobbled road that was built 100 years BEFORE they invaded”, C. Ellicott, Daily Mail, 2011.

<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1366468/Roman-road-doubt-discovery-cobbled-built-100-years-invasion.html>

« Le plus ancien bateau cousu de Méditerranée », interview de G. Boetto, archéologue naval, par N. Constans, <http://archo.blog.lemonde.fr>, 8 mars 2014. (consulté février 2016).

« L’art de la navigation dans l’Antiquité » P. Pomey, In: Regards sur la Méditerranée. Actes du 7ème colloque de la Villa, Kérylos à Beaulieu-sur-Mer les 4 & 5 octobre 1996. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1997. pp. 89-101.

[http://www.persee.fr/doc/keryl\\_1275-6229\\_1997\\_act\\_7\\_1\\_962](http://www.persee.fr/doc/keryl_1275-6229_1997_act_7_1_962)

« La forme des navires romains, d’après la mosaïque d’Althiburus » P.-M. Duval, In: Mélanges d’archéologie et d’histoire, tome 61, pp. 119-149, 1949.

[http://www.persee.fr/doc/mefr\\_0223-4874\\_1949\\_num\\_61\\_1\\_8511](http://www.persee.fr/doc/mefr_0223-4874_1949_num_61_1_8511)

« La felouque des Kellia », L. Basch, Neptunia, n° 183, p. 1-10, 1991.

« Military Communications: From Ancient Times to the 21<sup>st</sup> Century” C. H. Sterling, ABC-CLIO, 2008. Consultable en partie en ligne

“Animals in the military”, J. M. Kistler, ABC-CLIO, 2011. Consultable en partie en ligne

## **J. La médecine**

« Neanderthal medics? Evidence for food, cooking, and medicinal plants entrapped in dental calculus”, K. Hardy et al., Naturwissenschaften 99, 617-626, 2012.

“The oldest amputation on a Neolithic human skeleton in France” C. Buquet-Marcon, P. Charlier, and A. Samzun. Nature Precedings, 2007.

“Aux origines de la médecine”, D. Sicard et G. Vigarello, Fayard, 2011.

« Des grottes préhistoriques à l'Académie Royale de Chirurgie : survol d'un parcours chirurgical passionnant », J.-F. Mercier, e-mémoires de l'Académie Nationale de Chirurgie 13 (1) : 012-019, 2014.

“Herbal medicine in ancient Egypt”, N. H. Aboelsoud, Journal of Medicinal Plants Research Vol. 4(2), pp. 082-086, 2010. Consultable en ligne.

« The Edwin Smith surgical papyrus », J. H. Breasted, University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1960.

“The History of medicine in India and Burma”, M. S. Rao, Symposium on the History of Medicine in the Commonwealth, Royal College of Physicians of London, 1966. Consultable en ligne

“Detail Study on Boerhaavia Diffusa Plant for its Medicinal Importance- A Review”, AR Mahesh, Harish Kumar, Ranganath MK and Raviraj Anand Devkar, Res. J. Pharmaceutical Sci. 1, 28-36, 2012.

“Sushruta: The first Plastic Surgeon in 600 B.C”, S Saraf, R Parihar, The Internet Journal of Plastic Surgery. Volume 4, Number 2, 2006.

« Une petite histoire de la médecine », C. Chastel, Ellipses 2004.

« Histoire de la médecine De l'antiquité à nos jours », R. Dachez, Tallandier 2012.

« La thériaque : médicament et antidote », D. Parojcic, D. Stupar, M. Mirica, Veseallus IX, I, 28-32, 2003.

« Une histoire de la médecine, ou le souffle d'Hippocrate », J.-C. Ameisen, P. Berche, Y. Brohard, Editions la Martinière, Paris, 2011.

« Histoire de la médecine », N. Halioua, Masson 2001.

« Mercury and the kidney », C. R.P. George, J. Nephrol. 24(S17), S126, 2011.

## **Chapitre II : le Moyen Âge en Occident**

« L'effondrement a bien eu lieu », B. Ward-Perkins, L'histoire, mensuel n°415 (2015). Disponible en ligne.

### **A. Moulins et mécanismes**

« Boat mills: water powered, floating factories », K. De Decker, Low Tech Magazine, 2010. <http://www.lowtechmagazine.com/2010/11/boat-mills-bridge-mills-and-hanging-mills.html> (consulté septembre 2016)

“The Historical Aspect of Windmills Architectural Forms Transformation”, I. Zayats, *Procedia Engineering* 117, 685 – 695, 2015

## **B. Agriculture et élevage**

« Une histoire des agricultures », C. Ferault, D. Le Chatelier, France Agricole Eds, 2012.

« Le rôle du travail dans la révolution agricole », G. Mahlerwein, *Histoires et sociétés rurales* vol. 18, p.42, 2002.

<https://www.cairn.info/revue-histoire-et-societes-rurales-2002-2-page-41.htm>

“Power to the people – Energy in Europe over the last five centuries”, A. Kander, P. Malanima, P. Warde, Princeton University Press, Woodstock, 2013

« Recherches sur les instruments du labour au Moyen Âge », G. Bertrand. *Bibliothèque de l'école des chartes*, tome 120. pp. 5-38, 1962

« Diffusion et application des méthodes culturelles flamandes dans les anciens Pays-Bas méridionaux au xviii<sup>e</sup> siècle. Le témoignage de Jean- Baptiste Mondez, fermier en Hainaut autrichien », F. Delleaux, *Revue historique* n° 653, p. 27-58, 2010

## **C. Extraction minière, métallurgie, poterie et verrerie**

« De Re Metallica », G. Agricola, 1556 .

« The Mechanical Transmission of Power (1): Stangenkunst”, K. De Decker, *Low Tech magazine*, 2013, [www.lowtechmagazine.com](http://www.lowtechmagazine.com), consulté en novembre 2016.

“La production de fer au Moyen Âge ”, R. Sprandel, *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 24<sup>e</sup> année, N. 2, pp. 305-321, 1969.

[http://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1969\\_num\\_24\\_2\\_422055](http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1969_num_24_2_422055)

“Manuel théorique et pratique de la métallurgie du fer, Tome I », A. Ledebur, Paris, 1895

« Forgerons et orfèvres du Haut Moyen Âge. [Édouard Salin. La civilisation mérovingienne d'après les sépultures, les textes et le laboratoire. Troisième partie : Les techniques] », R. Lantier. *Journal des savants*, pp. 145-156, Octobre-décembre 1957.

[http://www.persee.fr/doc/jds\\_0021-8103\\_1957\\_num\\_4\\_1\\_5991](http://www.persee.fr/doc/jds_0021-8103_1957_num_4_1_5991)

« Le laiton produit en masse au Moyen Âge », D. Bourgarit et N. Thomas, *La Recherche* 468, 62, 2012.

« Penser la matière. Une histoire des chimistes et de la chimie », J. Baudet, Vuibert (Paris), 2004.

« De l'utilisation et de la préparation des cendres végétales par les verriers. Depuis L'antiquité jusqu'au XIX<sup>ème</sup> Siècle », J. Hartwig, [www.cristallerie-hartwig.com](http://www.cristallerie-hartwig.com), consulté en janvier 2017.

« Le verre plat dans le vitrail monumental des anciens Pays-Bas au XVI<sup>e</sup> siècle », I. Lecoq, Actes du 1<sup>er</sup> colloque international de l'association verre et histoire, Paris-la Défense, Versailles, 13-15 Octobre 2005

## **D. La chimie**

“Advances in 13<sup>th</sup> century glass manufacturing and their effect on chemical process”, S. C. Rasmussen, Bull. Hist. Chem., vol. 33, Number 1, p.28, 2008. Disponible en ligne.

« Encyclopédie, Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers », D. Diderot et J. Le Rond D'Alembert, Paris, 1751-1772.

« Production et commerce de l'alun oriental en Méditerranée, XI<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècles », D. Jacoby. L'alun de Méditerranée, P. Borgard, J.-P. Brun et M. Picon, pp. 219-267, Naples, 2005. Disponible en ligne.

“Eléments de minéralogie appliquées aux sciences chimiques”, J. Girardin et H. Lecoq, Paris, 1837.

“A History of Greek Fire and Gunpowder”, J. R. Partington. JHU Press, 1960. Consultable en partie en ligne.

« Penser la matière. Une histoire des chimistes et de la chimie », J. Baudet, Vuibert (Paris), 2004.

“The 100 most important chemical compounds : a reference guide”, R. L. Myers, ABC-CLIO, 2007.

“Sulfur: History, Technology, Applications and Industry”, G. Kutney, ChemTec Publishing, 2007. Consultable en partie en ligne.

“Some notes on the history of nitric acid”, V. Karpenko, Bull. Hist. Chem. 34, 2, 2009. Consultable en ligne

« Drinking ether in Ireland », R. A. Strickland, Mayo Clin Proc 71, 1015, 1996.

## **E. Textiles et cuir**

« Histoire quantitative de l'économie française-L'industrie française de 1789 à 1964-Analyse des faits », T.J. Markovitch, Institut de Science Economique Appliquée, Paris, 1966

« Encyclopédie, Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers », D. Diderot et J. Le Rond D'Alembert, Paris, 1751-1772.

« La maison, la fabrique et la ville. L'industrie du drap fin en France (XVe-XVIIIe siècles) », J.-F. Belhoste. Histoire, économie et société n°3, Lectures de la ville (XVe-XXe siècle) pp. 457-475, 1994.

[http://www.persee.fr/doc/hes\\_0752-5702\\_1994\\_num\\_13\\_3\\_1707](http://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1994_num_13_3_1707)

« Changements dans la productivité lainière au Moyen Âge ». W. Endrei, Annales. Économies, Sociétés, Civilisations. n° 6, pp. 1291-1299, 1971.

[http://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1971\\_num\\_26\\_6\\_422413](http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1971_num_26_6_422413)

« Les rubans bâlois (XVIII<sup>ème</sup>-XX<sup>ème</sup> siècles) : composition de l'offre et mobilité de la demande », A. Von Steiger, thèse de doctorat : Univ. Genève, no. SES 788, 2012.

« Le moulin à foulon, premier moulin de l'industrie textile lainière », J.-P. H. Azéma, Le Monde des Moulins - N°20 - avril 2007. Disponible en ligne.

## **F. Construction et fabrication**

« Note sur les matériaux de couverture utilisés en Normandie au Moyen Âge », M. de Boüard. Annales de Normandie, 15<sup>e</sup> année, n°3, Etudes d'archéologie normande. pp. 415-436, 1965.

[http://www.persee.fr/doc/annor\\_0003-4134\\_1965\\_num\\_15\\_3\\_6732](http://www.persee.fr/doc/annor_0003-4134_1965_num_15_3_6732)

« Recherches récentes concernant la maison paysanne en bois au Moyen Âge en Europe du nord-ouest », J. Decaëns. Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public, 3<sup>e</sup> congrès, Besançon, 1972.

[http://www.persee.fr/doc/shmes\\_1261-9078\\_1973\\_act\\_3\\_1\\_1558](http://www.persee.fr/doc/shmes_1261-9078_1973_act_3_1_1558)

« Les fenêtres des rois et des princes (XIVe-XVe siècles) », S. Lagabrielle, Acte du premier colloque international de l'association verre et histoire, Paris-La Défense / Versailles, 13-15 octobre 2005.

[http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p310\\_02\\_lagabrielle.html](http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p310_02_lagabrielle.html)

« Ampleur et diversité de la production du verre plat dans le royaume de France (XIV<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles) », M. Philippe, Acte du premier colloque international de l'association verre et histoire, Paris-La Défense / Versailles, 13-15 octobre 2005.

[http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p308\\_01\\_philippe.html](http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p308_01_philippe.html)

"Quand l'exception devient (presque) la règle : remarques sur le vitrage en France, XVI<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles », D. Woronoff, Acte du premier colloque international de l'association verre et histoire, Paris-La Défense / Versailles, 13-15 octobre 2005.

[http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p401\\_01\\_woronoff.html](http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p401_01_woronoff.html)

« L'Art de tourner ou de faire en perfection toutes sortes d'ouvrages au tour », C. Plumier, C.-A. Jombert (Paris), 1750.

« Encyclopédie, Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers », D. Diderot et J. Le Rond D'Alembert, Paris, 1751-1772.

## **G. Eau, hygiène et confort**

« Le temps de l'eau rare du Moyen Âge à l'époque moderne », D. Roche. In: Annales. Économies, Sociétés, Civilisations. 39<sup>e</sup>année, n° 2, pp. 383-399, 1984.

[http://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1984\\_num\\_39\\_2\\_283062](http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1984_num_39_2_283062)

« Archéo-iconographie du puits au Moyen Âge (XIII<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècle) », D. Alexandre-Bidon. Mélanges de l'École française de Rome. Moyen Âge, tome 104, n°2, pp. 519-543, 1992.

[http://www.persee.fr/doc/mefr\\_1123-9883\\_1992\\_num\\_104\\_2\\_3256](http://www.persee.fr/doc/mefr_1123-9883_1992_num_104_2_3256)

« Montpellier médiéval : urbanisme et architecture », J. Peyron, Annales du Midi : revue archéologique, historique et philologique de la France méridionale, Tome 91, n°143, pp. 255-272, 1979.

[http://www.persee.fr/doc/anami\\_0003-4398\\_1979\\_num\\_91\\_143\\_1763](http://www.persee.fr/doc/anami_0003-4398_1979_num_91_143_1763)

« Les fontaines médiévales. Images et réalité ». C. Gouédo-Thomas, Mélanges de l'École française de Rome. Moyen Âge, tome 104, n°2, pp. 507-517, 1992.

[http://www.persee.fr/doc/mefr\\_1123-9883\\_1992\\_num\\_104\\_2\\_3255](http://www.persee.fr/doc/mefr_1123-9883_1992_num_104_2_3255)

« L'eau et les nouveautés techniques dans l'espace urbain et suburbain au Moyen Âge », U. Sowina. L'innovation technique au Moyen Âge. Actes du VI<sup>e</sup> Congrès international d'Archéologie Médiévale (1-5 Octobre 1996, Dijon – Mont Beuvray - Chenôve - Le Creusot - Montbard) Caen : Société d'Archéologie Médiévale, pp. 81-87, 1998.

[http://www.persee.fr/doc/acsam\\_0000-0000\\_1998\\_act\\_6\\_1\\_1125](http://www.persee.fr/doc/acsam_0000-0000_1998_act_6_1_1125)

« Essai sur les moyens de conduire: d'élever et de distribuer les eaux », R. Genieys, Carilian-Goeury, 1829. Disponible en ligne.

« Les Merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes - L'art de l'éclairage », Louis Figuier, 1870. Disponible en ligne.

« Des produits chimiques très recherchés-les acides gras pour la fabrication des bougies », G. Emptotz, culture technique n°23, 1991. Disponible en ligne.

« Gardiens de phares », J.-C. Fichou, Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 2002. Disponible en ligne.

« Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI<sup>ème</sup> au XVI<sup>ème</sup> siècle, tome III », E. Viollet-le-Duc, Édition Bance-Morel, 1854-1868. Disponible en ligne.

## **H. Transports et communications**

« La première révolution des transports continentaux (c. 1000 - c. 1300) », A. Derville, Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public, 7<sup>e</sup> congrès, Rennes, 1976.

**[http://www.persee.fr/doc/shmes\\_1261-9078\\_1978\\_act\\_7\\_1\\_1233](http://www.persee.fr/doc/shmes_1261-9078_1978_act_7_1_1233)**

« Le trafic en Dauphiné à la fin du Moyen Âge. [Esquisse rétrospective de géographie économique] » A. André, Revue de géographie alpine, tome 11, n°2, pp. 373-420, 1923.

**[http://www.persee.fr/doc/rga\\_0035-1121\\_1923\\_num\\_11\\_2\\_5512](http://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1923_num_11_2_5512)**

« Les transports sur la Seine aux XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles », A. Sadourny. Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public, 7<sup>e</sup> congrès, Rennes, 1976.

**[http://www.persee.fr/doc/shmes\\_1261-9078\\_1978\\_act\\_7\\_1\\_1235](http://www.persee.fr/doc/shmes_1261-9078_1978_act_7_1_1235)**

« Aperçu sur les transports fluviaux sur le Pô au bas Moyen Âge », P. Racine. Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public, 7<sup>e</sup> congrès, Rennes, 1976.

**[http://www.persee.fr/doc/shmes\\_1261-9078\\_1978\\_act\\_7\\_1\\_1237](http://www.persee.fr/doc/shmes_1261-9078_1978_act_7_1_1237)**

« Grandeur et décadence de la navigation fluviale: l'exemple du bassin supérieur de la Garonne du milieu du XVII<sup>e</sup> au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle », J.-M. Minovez, Histoire, économie et société, 18, pp. 569-592, 1999.

**[http://www.persee.fr/doc/hes\\_0752-5702\\_1999\\_num\\_18\\_3\\_2050](http://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1999_num_18_3_2050)**

« Quelques éléments sur l'évolution de la suspension des voitures », « Voiture suspendue de type Hongrois », « Ackerman, Lankensperger et l'origine de la direction automobile », « Avant-Train; "ronds à coulisse" du Clarence de

Marcigny », Figoli, 2009-2014. <http://www.attelage-patrimoine.com>, consulté en juin 2016.

« L'invention des ressorts de voiture » M. Terrier, Revue d'histoire des sciences, tome 39, n°1, pp. 17-30, 1986.

[http://www.persee.fr/doc/rhs\\_0151-4105\\_1986\\_num\\_39\\_1\\_4016](http://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1986_num_39_1_4016)

« Navigation et ports fluviaux dans la moyenne Charente, de l'Antiquité tardive au XIe siècle d'après l'archéologie et les textes », J. Chapelot, E. Rieth, Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public, 35<sup>e</sup> congrès, La Rochelle, 2004. [http://www.persee.fr/doc/shmes\\_1261-9078\\_2005\\_act\\_35\\_1\\_1879](http://www.persee.fr/doc/shmes_1261-9078_2005_act_35_1_1879)

« La canalisation des rivières en France », R. Musset, Annales de Géographie, t. 47, n°269, pp. 500-504, 1938.

[http://www.persee.fr/doc/geo\\_0003-4010\\_1938\\_num\\_47\\_269\\_11678](http://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1938_num_47_269_11678)

« Notes au sujet de l'ancien flottage du bois sur le Doubs », A. Gilbert, Revue de géographie alpine, tome 21, n°2, pp. 433-446, 1933.

[http://www.persee.fr/doc/rga\\_0035-1121\\_1933\\_num\\_21\\_2\\_5361](http://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1933_num_21_2_5361)

« Flottage de bois et gestion forestière-exemple du bassin parisien du XVIe au XIXe siècle », J. Buridant, Rev. For. Fr. LVIII - 4-2006. Disponible en ligne

« Le flottage du bois et le changement du paysage fluvial des montagnes françaises », J.-P. Bravard. Médiévales, n°36, pp. 53-61, 1999.

[http://www.persee.fr/doc/medi\\_0751-2708\\_1999\\_num\\_18\\_36\\_1446](http://www.persee.fr/doc/medi_0751-2708_1999_num_18_36_1446)

« Reconstitution des débits des crues artificielles destinées au flottage du bois dans le massif du Morvan (centre de la France, XVIe-XIXe siècles) d'après les documents d'archive et la géomorphologie de terrain », A.-S. Poux, F. Gob et N. Jacob-Rousseau, Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 17 - n° 2, 143-156, 2011. Disponible en ligne.

« Trois cents ans d'application de la durabilité au secteur forestier », F. Schmithüsen, Unasylva 240, Vol. 64, 2013/1. Disponible en ligne

« Des siècles de lutte contre l'envasement », P. Schnepf, magazine Chasse-Marée n°44, 1989.

« Les havrais et la mer », P. Manneville, Editions PTC, 2004.

« Architecture hydraulique, ou L'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie », B. Forest de Bélidor, Paris, 1787.

## I. La médecine

« L'image et le rôle du pharmacien d'officine : une réflexion illustrée par la littérature », E. Fouassier, thèse soutenue en 1993 à l'Université Paris XI.

« Une histoire de la médecine, ou le souffle d'Hippocrate », J.-C. Ameisen, P. Berche, Y. Brohard, Editions la Martinière, Paris, 2011.

« Histoire de la médecine », N. Halioua, Masson 2001.

« L'arcenal de chirurgie de Jean Scultet », J. Scultet, Lyon, 1712.

« Des anesthésiques dans l'Antiquité et le Moyen Âge », G. Lagneau., Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 29, pp. 163-172, 1885.

[http://www.persee.fr/doc/crai\\_0065-0536\\_1885\\_num\\_29\\_2\\_69089](http://www.persee.fr/doc/crai_0065-0536_1885_num_29_2_69089)

« Recherches sur l'histoire de l'anesthésie avant 1846 », M. L. Baur, E.J. Brill, 1927.

« Medieval anesthesia – the spongia somnifera », P. Prioreshi, Medical Hypotheses 61, 213–219, 2003.

« Transmission des progrès scientifiques en Europe au XVIIIe siècle », C. Gofstein, Revue de la société d'études anglo-américaines des XVIIe et XVIIIe siècles. N°64. La Bible dans le monde anglo-américain des XVIIe et XVIIIe siècles [Colloque tenu en Sorbonne les 25 et 26 novembre 2006] pp. 357-381, 2007.

[http://www.persee.fr/doc/xvii\\_0291-3798\\_2007\\_num\\_64\\_1\\_2350](http://www.persee.fr/doc/xvii_0291-3798_2007_num_64_1_2350)

« La thériaque : médicament et antidote », D. Parojcic, D. Stupar, M. Mirica, Veseallus IX, I, 28-32, 2003.

« La thériaque diatessaron ou thériaque des pauvres », J. Flahaut, **Revue d'histoire de la pharmacie** 46(318), 173-82, 1998.

« La querelle de l'antimoine et la victoire de la chimie, Parties I et II ». G. Mascherpa, L'Actualité Chimique, avril 1982, p. 45 et mai 1982, p. 45. Disponible en ligne.

« Histoire du traitement de la syphilis par le mercure : 5 siècles d'incertitudes et de toxicité ». G. Tilles, D. Wallach, Revue d'histoire de la pharmacie, 84<sup>e</sup> année, n°312, 1996. Actes du XXXIe Congrès International d'Histoire de la Pharmacie (Paris, 25-29 septembre 1995) pp. 347-351.

[http://www.persee.fr/doc/pharm\\_0035-2349\\_1996\\_num\\_84\\_312\\_6244](http://www.persee.fr/doc/pharm_0035-2349_1996_num_84_312_6244)

### **III. La révolution industrielle**

#### **Sources génériques**

« La révolution industrielle (1770-1880) », J.-P. Rioux, Editions du seuil, 1971.

« Histoire de la France Industrielle », M. Lévy-Leboyer, Larousse, 1996

« Révolution Industrielle », J.-C. Asselain, Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 4 février 2017.

**<http://www.universalis.fr/encyclopedie/revolution-industrielle>**

« Energy and the English Industrial Revolution », E. A. Wrigley, Cambridge University Press, Royaume-Uni, 2010.

« La révolution industrielle anglaise : une révision (note critique) », P. Verley, Annales. Economies, sociétés, civilisations, n°3, pp. 735-755, 1991.

**[https://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1991\\_num\\_46\\_3\\_278973](https://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1991_num_46_3_278973)**

#### **A. Le coke et la sidérurgie**

« An Early Energy Crisis and Its Consequences » J. U. Nef, Scientific American, Nov. 1977, p. 140-151.

« Manuel théorique et pratique de la métallurgie du fer, Tome I et II », A. Ledebur, Paris, 1895

« L'album du cours de métallurgie professé à l'école centrale des arts et manufactures », S. Jordan, Paris, 1875

« Darby Abraham - (1678-1717) », B. Jacomy, Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 4 janvier 2017.

**<http://www.universalis.fr/encyclopedie/abraham-darby/>**

#### **B. La machine à vapeur**

« A history of the growth of the steam engine », R. H. Thurston, New-York, 1886

« A history of steam power », J. Lovland, Trondheim (Norvège), 2007

**[http://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history\\_of\\_steam\\_power.pdf](http://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history_of_steam_power.pdf)**

« A History of the American Locomotive: Its Development, 1830-1880 », J. H. White, Courier Corporation, 1979.

## **C. Les rétroactions positives**

“A history of the growth of the steam engine”, R. H. Thurston, New-York, 1886

« Albion Mills », R. Woollard, Vauxhall History, 2012.

<http://vauxhallhistory.org/albion-mill/>

“Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes- Les locomobiles », L. Figuier, 1867

« 1851 Great Exhibition : Official Exhibition », en anglais,

[http://www.gracesguide.co.uk/1851\\_Great\\_Exhibition](http://www.gracesguide.co.uk/1851_Great_Exhibition),

## **IV. Une transition énergétique**

### **A. Quelques mots sur l'énergie**

« Sustainable energy – without the hot air », D. J. C. MacKay, UIT Cambridge Ltd., Cambridge, 2009. Disponible en ligne.

### **B. Types d'énergie et rendement dans le système énergétique traditionnel**

“Energies”, V. Smil, The MIT Press, Cambridge, 1999

« Le bois mort, une lacune des forêts gérées », D. Vallauri, J. André, J. Blondel, Revue Forestière, Vol. 55, p. 99-112, 2003.

“Power to the people – Energy in Europe over the last five centuries”, A. Kander, P. Malanima, P. Warde, Princeton University Press, Woodstock, 2013

« Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Deuxième partie : les besoins en superficie forestière », B. Hardy, J. E. Dufey, Revue Forestière, Vol. 64, p. 799, 2012.

« Les trois révolutions agricoles du monde développé : rendements et productivité de 1800 à 1985 ». P. Bairoch, Annales. Économies, Sociétés, Civilisations. 44<sup>e</sup> année, n° 2, 317-353 1989

[http://www.persee.fr/doc/ahess\\_0395-2649\\_1989\\_num\\_44\\_2\\_283596](http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1989_num_44_2_283596)

« Sustainable energy – without the hot air », D. J. C. MacKay, UIT Cambridge Ltd., Cambridge, 2009. Disponible en ligne.

« Wind powered factories: history (and future) of industrial windmills», K. De Decker, Low Tech Magazine, 2010.

<http://www.lowtechmagazine.com/2009/10/history-of-industrial-windmills.html>

consulté en février 2017

« Global abundance and size distribution of streams and rivers », J.A. Downing, J.J. Cole, C.M. Duarte, J.J. Middelburg, J.M. Melack, Y.T. Prairie, P. Kortelainen, R.G. Striegl, W.H. McDowell, and L.J. Tranvik, *Inland Waters* 2, pp. 229-236, 2012

« Le moulin à vent en Bretagne, « Cette belle et ingénieuse machine... » », L. Durand-Vaugaron, *Annales de Bretagne*. Tome 74, numéro 2, 299-348, 1967

[http://www.persee.fr/doc/abpo\\_0003-391x\\_1967\\_num\\_74\\_2\\_2407](http://www.persee.fr/doc/abpo_0003-391x_1967_num_74_2_2407)

« Power from wind – a history of windmill technology », R. L. Hills, Cambridge University Press (Cambridge), 1994.

### **C. Répartition dans le système énergétique traditionnel**

« Energy consumption and energy crisis in the roman world », P. Malanima, Roma, American Academy, Environmental History Conference 15<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> June, 2011. Disponible en ligne

« The uptake of mechanical technology in the ancient world: the water-mill », A. Wilson, The Oxford Roman Economy Project, Working paper, 2007. Disponible en ligne.

“Power to the people – Energy in Europe over the last five centuries”, A. Kander, P. Malanima, P. Warde, Princeton University Press, Woodstock, 2013

« Energy and the English Industrial Revolution », E. A. Wrigley, Cambridge University Press, Royaume-Uni, 2010.

### **D. La transition vers le système énergétique moderne**

“Power to the people – Energy in Europe over the last five centuries”, A. Kander, P. Malanima, P. Warde, Princeton University Press, Woodstock, 2013

« Energy, environment and development », J. Goldemberg, O. Lucon, Earthscan, 2010.

“A history of steam power”, J. Lovland, Trondheim (Norvège), 2007

[http://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history\\_of\\_steam\\_power.pdf](http://folk.ntnu.no/haugwarb/TKP4175/History/history_of_steam_power.pdf)

« Energy consumption in England and Wales », P. Warde, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Studi sulle Società del Mediterraneo, 2007

« Energy and the English Industrial Revolution », E. A. Wrigley, Cambridge University Press, Royaume-Uni, 2010.

“The first modern economy”, J. de Vries, A. van der Woude, Cambridge University Press (Royaume-Uni), 1997

“La houille et l’exportation de la houille anglaise », C. J. Minard, Paris, E. Thunot, 1866. Disponible en ligne.

« L’Industrie française de 1789 à 1964, analyse des faits (suite) », T. J. Markovitch, Institut de science économique appliquée, Paris, 1966.

« Statistiques de l’industrie minérale et des appareils à vapeur », Mines Paris Tech. Série de rapports par année. Disponibles en ligne.

« La modernité de la tradition : les énergies renouvelables classique –l’eau et le bois- dans la voie française de l’industrialisation, c. 1750 – c. 1880 », S. Benoit, thèse de l’Université Evry Val d’Essonne, 2006.

"La statistique des forces motrices », M. Huber, Journal de la société statistique de Paris, tome 73, 397, 1932.

## **E. L’évolution du système traditionnel pendant et après la révolution industrielle**

« La modernité de la tradition : les énergies renouvelables classique –l’eau et le bois- dans la voie française de l’industrialisation, c. 1750 – c. 1880 », S. Benoit, thèse de l’Université Evry Val d’Essonne, 2006.

« Les origines des turbines Francis et Pelton : développement de la turbine hydraulique aux États-Unis, de 1820 à 1900. L. C. Hunter, Revue d’histoire des sciences et de leurs applications, tome 17, n°3, pp. 209-242, 1964.

[http://www.persee.fr/doc/rhs\\_0048-7996\\_1964\\_num\\_17\\_3\\_2345](http://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1964_num_17_3_2345)

« Architecture hydraulique, ou L’art de conduire, d’élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie », B. Forest de Bélidor, Paris, 1787.

« L’énergie et le développement: ressources renouvelables et options techniques pour les pays en développement », National Academy of Sciences, National academies, 1977. Disponible en partie en ligne.

« Major historical developments in the design of water wheels and Francis hydroturbines », B. J. Lewis, J. M. Cimbala, and A. M. Wouden, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 22, 012020, 2014. Disponible en ligne.

« Power from wind – a history of windmill technology », R. L. Hills, Cambridge University Press (Cambridge), 1994.

« Wind powered factories: history (and future) of industrial windmills», K. De Decker, Low Tech Magazine (2010).

<http://www.lowtechmagazine.com/2009/10/history-of-industrial-windmills.html> (consulté en janvier 2018)

## **Conclusion**

« L’anthropocène contre l’histoire », A. Mann, La Fabrique, 2017.

« La modernité de la tradition : les énergies renouvelables classique –l’eau et le bois- dans la voie française de l’industrialisation, c. 1750 – c. 1880 », S. Benoit, thèse de l’Université Evry Val d’Essonne, 2006.

« La transition, piège à cons », J.-B. Fressoz, 2018, <https://youtu.be/1O0r5O4-2wU>