



Bulletin de la Sabix

Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique

25 | 2000

Le cours de Machines de l'Ecole polytechnique, de sa création jusqu'en 1850

Les dessins de machines à l'École polytechnique (1794-1850), iconographie commentée

Jean-Yves Dupont



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/sabix/258>

ISSN : 2114-2130

Éditeur

Société des amis de la bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique (SABIX)

Édition imprimée

Date de publication : 1 octobre 2000

Pagination : 37-79

ISBN : ISSN N° 2114-2130

ISSN : 0989-30-59

Référence électronique

Jean-Yves Dupont, « Les dessins de machines à l'École polytechnique (1794-1850), iconographie commentée », *Bulletin de la Sabix* [En ligne], 25 | 2000, mis en ligne le 05 novembre 2010, consulté le 20 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/sabix/258>

Ce document a été généré automatiquement le 20 avril 2019.

© SABIX

Les dessins de machines à l'Ecole polytechnique (1794-1850), iconographie commentée

Jean-Yves Dupont

- 1 Cet ensemble de reproductions - planches imprimées et dessins d'élèves - choisies dans les Archives conservées à la Bibliothèque centrale, permet de se faire une idée de ce que fut le « cours de Machines » de l'Ecole polytechnique entre 1794 et 1850. La mise en place d'un cours autonome n'aboutit qu'en 1806, dans le cadre de la Géométrie. Il rejoint les Applications de l'Analyse après 1817, et devient « cours de Machines et d'Hydraulique » en 1839. Pour finir, cet enseignement sera rattaché à celui de la mécanique rationnelle, qui se détache alors de l'Analyse, pour former en 1850 le « cours de Mécanique et Machines ».
- 2 La lecture de ce corpus doit prendre en compte, tout à la fois et malgré des niveaux d'analyse différents, les évolutions et les permanences sur un demi-siècle :
 - du style de représentation des dessins techniques ;
 - du type de machines utilisées dans l'industrie française ;
 - de l'organisation d'un enseignement de mécanique appliquée ;
 - du projet global de formation des ingénieurs des corps de l'Etat.

Sommaire des planches :

- Planches 1 à 3 : Planches de *l'Encyclopédie* de DIDEROT & d'ALEMBERT [1762 - 1772].
- Planches 4 à 6 : Planches et dessin correspondant aux cours de PRONY et de HASSENFRATZ [1794 - 1806].
- Planche 7 : Emploi du temps des vacances [1806].
- Planches 8 à 11 : Travail demandé aux élèves, cours de HACHETTE [1806 - 1815].

- Planches 12 et 13 : Classification des machines : HACHETTE, *Rapport sur l'Ecole Impériale Polytechnique, session 1807* [avril 1808] - LANZ & BETANCOURT, *Essai sur la composition des machines* [1808].
 - Planches 14 et 15 : Planches du *Traité élémentaire des machines*, HACHETTE [1811].
 - Planches 16 à 19 : Planches du cours de ARAGO [1820 - 1830].
 - Planches 20 à 23 : Planches et dessins, cours de SAVARY [1831 - 1840].
 - Planches 24 à 25 : Dessins correspondant au cours de CHASLES [1841 - 1850].
- 3 NB : Les dimensions des originaux sont précisées : largeur x hauteur, en centimètre, ainsi que leur référence dans les archives de l'Ecole polytechnique [AEP].

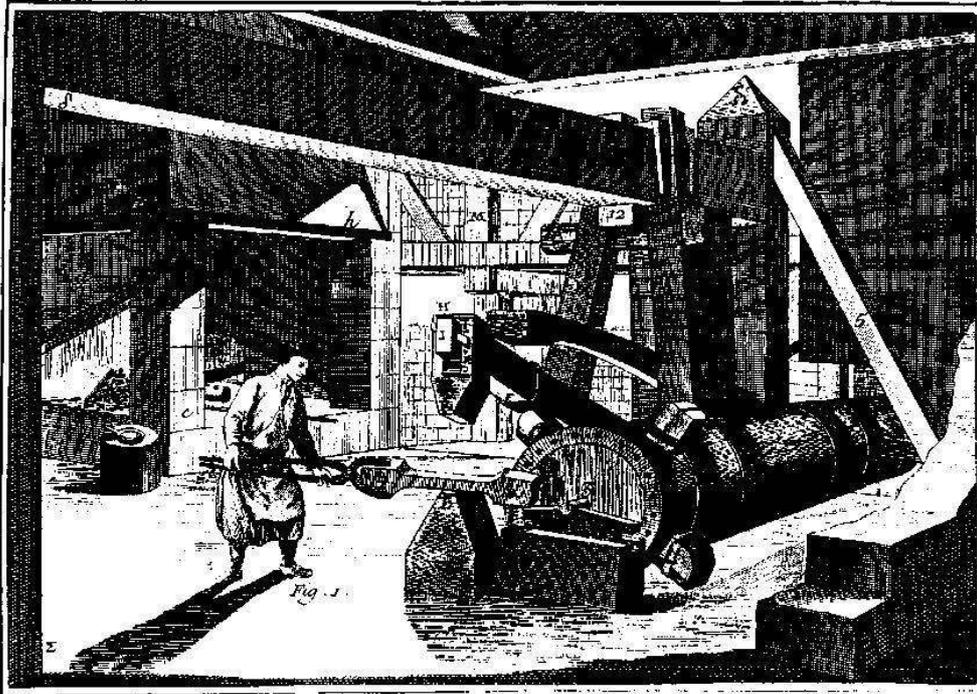
Diderot et d'Alembert, Recueil de planches sur les sciences, les arts libéraux et les arts mécaniques avec leur explication, 11 volumes, 1762-1772

- 4 Les différentes branches de l'activité artisanale ou industrielle du XVIIIe siècle sont décrites en détail dans les très nombreux fascicules de la *Description des Arts et Métiers*, publiés sous le patronage de l'Académie des Sciences entre 1760 et 1788. De leur côté, Diderot et d'Alembert dirigent l'*Encyclopédie* ou *Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (17 volumes parus entre 1751 et 1765), qu'ils accompagnent d'un *Recueil de planches sur les sciences, les arts libéraux et les arts mécaniques avec leur explication* (11 volumes parus entre 1762 et 1772). En 1776-77, Panckoucke en offre un *Supplément* (4 volumes de texte et 1 de planches) - avant de se lancer dans son propre projet, l'*Encyclopédie méthodique*, qui durera jusqu'en 1832.
- 5 Compilation qui dépasse très largement le cadre auquel se restreint cet article, le *Recueil* qui accompagne l'*Encyclopédie* présente les machines et les outils les plus couramment utilisés dans l'industrie, l'agriculture ou l'architecture, et concernant le travail du bois, des métaux ou des textiles... On y trouve notamment divers moulins à eau ou à vent, des machines employées dans les travaux publics, dans les mines ou dans les forges - illustrant ainsi le contexte dans lequel s'est organisé l'enseignement de machines à l'Ecole polytechnique.
- 6 Lorsque Hachette rédige le programme du « cours élémentaire des Machines » pour la session 1807, il l'articule autour des moteurs hydrauliques ou à vapeur, des machines élémentaires de transformation de mouvement et des machines plus complexes d'un usage spécialisé - parallèlement aux techniques du dessin de machines.

Planche 1 : Forges - Marteau-pilon ou martinet ENCYCLOPEDIE (Planches, troisième livraison : 1765)

- 7 Un moteur (roue hydraulique, non représentée sur la gravure, mais que l'on peut deviner derrière, en dehors de l'atelier) entraîne l'arbre horizontal de gros diamètre, sur lequel sont fixées quatre dents. Celles-ci soulèvent le lourd marteau, monté sur une bascule (au centre de la figure). A l'échappement de chaque engrènement, le marteau retombe sous l'effet de son propre poids, et vient déformer la pièce de métal chauffé, maintenue sur l'enclume par un ouvrier à l'aide de grandes pinces. Cette installation, qui se retrouve dans toutes les forges, sera plus tard remplacée par les marteaux à vapeur (à déplacement rectiligne vertical).

Marteau-pilon ou martinet



- 8 Le mécanisme à came, transformant un mouvement de rotation continue en mouvement alternatif (ici de rotation, mais il pourrait aussi bien s'agir de translation), servira de support aux premiers dessins de machines du cours de Hachette sous la rubrique « cames et pilons », ainsi qu'à l'étude des machines élémentaires.
- 9 Il est d'usage aujourd'hui d'abord la géométrie des surfaces conjuguées en général, avant de passer à leurs applications : on considère, par conséquent, une dent d'engrenage comme un cas particulier des systèmes à came. Mais Hachette traite d'abord les roues dentées (transmission de mouvements de rotation), puis étudie les mécanismes - dérivés - de transformation du mouvement de rotation en translation : pilon à déplacement rectiligne, association roue et crémaillère ; voir son *Traité élémentaire des machines* (1811 et 1819).
- 10 Voir planche 12, vignettes 5b-B et 7a-C. Hachette parle aussi de « came » pour les vignettes 5a-C et 7a-B, mais pas pour les vignettes 5-A et 5-B (courbes en coeur), 5-C, 5a-D et 5a-E, 5c-C, 7-A et 7-B, comme on le ferait aujourd'hui. Comparer avec la planche 13, vignettes M-7 et E-9... Voir aussi la planche 20, présentant les engrenages et les échappements (Savary reprenant l'ensemble came pilon).

Monnoyage, balancier

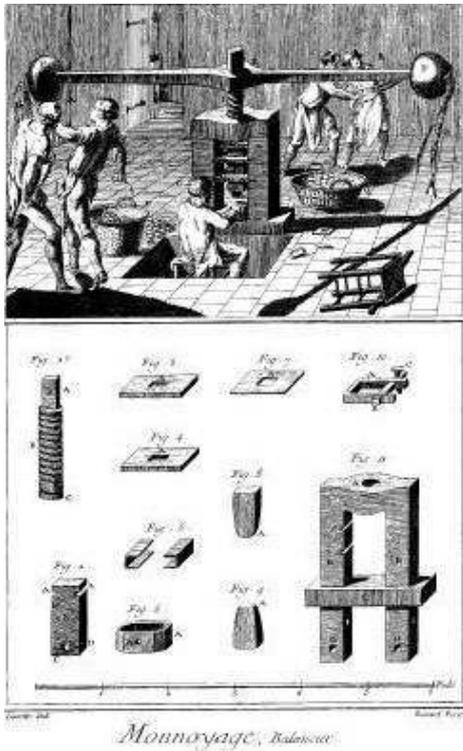


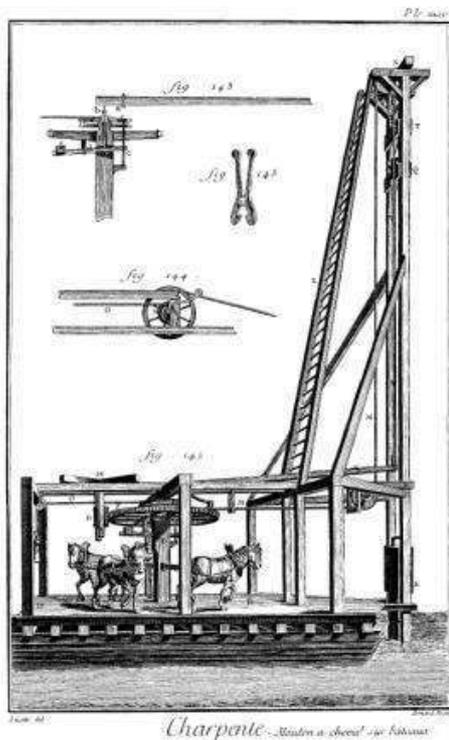
Planche 2 : *Monnayage, Balancier* - Presse à choc par vis-écrou - Encyclopédie (Planches, septième livraison : 1771)

- 12 Cette machine, d'un usage particulier, est mise en mouvement par quatre hommes : tirant sur les cordages, ils entraînent la vis en rotation (celle-ci possède une grande inertie du fait des masses sphériques excentrées). L'écrou étant fixe, la vis descend et vient frapper la pièce de monnaie par l'intermédiaire d'un poinçon, l'ouvrier assis manipulant les pièces une par une.
- 13 Ce mécanisme de type vis-écrou étant en activité à l'Hôtel de la Monnaie, les élèves pouvaient aller le voir fonctionner. Il introduit les exercices mis en place par Hachette : représentation des filetages (vis à filet carré ou triangulaire) avec construction graphique des ombres. Il permet, par ailleurs, l'étude d'une transformation de mouvement - de rotation en translation - qui se retrouve dans de nombreuses machines. Voir aussi le *Traité élémentaire des machines* (première édition, 1811), où Hachette fait suivre la description de cette installation d'une estimation du travail humain. Ces développements ne seront pas repris dans la seconde édition de 1819.
- 14 Le monnayage, marquage des pièces au sceau de l'Etat, était effectué manuellement (au marteau) jusqu'à l'interdiction du procédé en 1645. Le « balancier monétaire », perfectionné par Gingembre, est alors utilisé jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle où il est remplacé par une « presse monétaire » pour la frappe des monnaies (mais non des médailles). Cette nouvelle machine, attribuée à Thonnellier, agissant sans choc et d'une manière continue, améliore notablement la régularité des gravures et la cadence de production : elle est constituée d'une machine à vapeur, avec bielle-manivelle et renvoi par levier, et pourvue d'une alimentation automatique des flans.

- 15 Voir les **planches 8 et 9** (dessin d'élève et recherche théorique des ombres sur les filetages, par Hachette). Voir **planche 12**, vignette 3-E (vis-écrou) et 3a-A (vis différentielle, dite *Nonius* ou de Prony), mais aussi 5b-D (commande alternative de navette de filature) et 6-D (commande alternative de rouet ou de machine à organsiner les soies). Comparer avec la **planche 13**, vignettes 3-C et 3-D, 7-O et 8-E ; et voir également 10-F (tracé d'hélice circulaire) et 10-G (tour à fileter). Voir encore la **planche 16** de Arago (5ème dessin : micromètre de Prony à vis différentielle).

Planche 3 : Charpente. Mouton à chevaux, sur bateau - Sonnette à battre les pieux - Encyclopédie (Planches, deuxième livraison : 1763)

Charpente, Mouton à chevaux sur bateaux



- 16 La gravure représente une machine mue par des chevaux (« moteur animé » dont on cherchera à évaluer le travail, et le coût). Ceux-ci entraînent un cabestan qui permet de monter un poids (le mouton), guidé par des rails verticaux. Un dispositif à déclat le laisse retomber sur les pieux à enfoncer dans le sous-sol ; le mécanisme représenté à grande échelle permet de désaccoupler l'entraînement, afin de ne pas interrompre le mouvement des chevaux. Cette machine, utilisée de 1738 à 1750 pour la construction du pont de Westminster à Londres, est aussi reproduite dans le journal de voyage de Perronet et Lesage (1784).
- 17 Les « machines employées dans les constructions » devaient être connues des ingénieurs appelés à diriger des travaux de génie civil ou militaire. Aussi les retrouve-t-on très tôt dans les enseignements de l'Ecole, sans que leur place ne soit bien fixée, passant du cours de travaux publics au cours de machines, dont elles contribuent à établir la nécessité. Les

machines de ce type seront progressivement retirées des programmes entre 1824 et 1849 - mais non totalement.

- 18 Les machines servant aux constructions comprennent les grues, les machines à battre et à recéper les pieux (après fonçage des pieux dans le lit d'un fleuve, il faut les scier à la même hauteur afin d'asseoir les fondations), les machines à élever l'eau (permettant d'assécher les caissons lors de la construction des piles de ponts), ainsi que les machines à draguer les ports.

Planches et dessins correspondant (*vraisemblablement*) au cours de Mécanique de Prony et au cours des Mines de Hassenfratz - [1794 - 1806]

- 19 Gaspard Riche de Prony est chargé, dès l'origine de l'Ecole polytechnique, du cours d'Analyse appliquée à la Mécanique, puis du cours de Mécanique lorsque ces deux matières sont séparées en 1796. Son cours comporte quelques développements sur les machines - essentiellement hydrauliques ou à vapeur. Les pompes mues à la vapeur sont d'ailleurs décrites dans la seconde partie de sa *Nouvelle architecture hydraulique*, parue en 1796, et la planche imprimée conservée dans le recueil de *Dessins de Machines* des archives de l'Ecole est de la même veine.
- 20 Jean Henri Hassenfratz est chargé de l'enseignement de la Physique dès le début de l'Ecole, ainsi que de visites d'ateliers et manufactures à partir de 1796. Il prend également en charge un cours sur l'Exploitation des mines, vers 1798, en présentant les principales machines qu'on y emploie. Ce cours, critiqué par les écoles d'application (de même que le cours de Travaux publics de Sganzin) comme faisant double emploi avec leur propre enseignement, est remplacé en 1806 par le cours de Machines de Hachette. Le recueil de *Dessins de Machines* des archives de l'Ecole comporte une planche imprimée et deux lavis que l'on peut associer directement aux travaux des mines.

Planche 4 : *Machines. Pompe à feu - Machine à vapeur de Watt Prony - AEP : Epures 1794-1850 - planche imprimée [22,5 x 34,5 cm]*

- 21 La machine de Newcomen, de même que la première machine de Watt, est « à simple effet », car la vapeur n'est introduite que d'un seul côté du piston. Ces machines étaient alors utilisées pour actionner des pompes (aspirantes et foulantes) à fonctionnement alternatif, et dont le mouvement de retour était assuré par un contrepoids. De telles machines resteront en usage dans les entreprises minières au XIXe siècle.
- 22 La seconde machine de Watt (brevet anglais en 1781) est une machine « à double effet », qui permit la construction d'une « machine de rotation », mise au point aux Albions Mills en 1784. Bétancourt, de passage en Angleterre, réussit à l'entrevoir de loin et en fit un compte-rendu le 16 décembre 1789 à l'Académie des Sciences de Paris. Les frères Périer en entreprirent alors une réalisation en 1790-91 à l'Île des Cygnes, afin d'entraîner des moulins à farine ; un brevet d'importation et perfectionnement fut déposé en 1792.
- 23 Cette première machine à double effet construite en France est décrite par Prony en 1796. Le dessin de la **planche 4**, très semblable par sa facture aux planches de son livre (dans un style caractéristique de la fin du XVIIIe siècle), est un peu plus tardif dans la mesure où l'on y aperçoit le régulateur qui avait échappé à Bétancourt. La présentation de cette

machine a toujours fait partie de l'enseignement de Mécanique de Prony. Et l'inventaire des Cabinets de l'Ecole mentionne, à la fin de 1807, une gravure de pompe à feu reproduite en nombreux exemplaires pour son cours.

- 24 La vapeur étant introduite dans le cylindre alternativement au-dessous et au-dessus du piston, l'effet moteur est obtenu pour chaque course de celui-ci, dans l'un et l'autre sens. La chaîne qui reliait le piston au balancier (voir la **planche 14** de Hachette) est alors remplacée par une tige rigide ; à sa partie supérieure, elle est reliée au balancier par l'intermédiaire d'un système articulé (le parallélogramme de Watt, 1784), permettant la transformation (approximative) d'un « mouvement rectiligne » en « mouvement circulaire » (voir la **planche 17** de Arago). Le mouvement alternatif de rotation du balancier est alors transformé en mouvement continu de rotation par un système d'engrenage planétaire (dit aussi mouche de Watt), visible en bas à droite de la figure ; le système plus classique de bielle-manivelle (voir les **planches 18 et 19** de Arago) était alors, en Angleterre, protégé par un brevet. Le régulateur à boules, que l'on aperçoit au milieu de la figure, fut introduit un peu plus tard par Watt, en 1787, pour adapter l'admission de la vapeur à la vitesse de rotation de la machine. (Voir aussi la planche 6 de Hassenfratz et la planche 14 de Hachette pour la description du mécanisme à double effet, dont on aperçoit à droite le détail de la commande des clapets.)

Pompe à feu

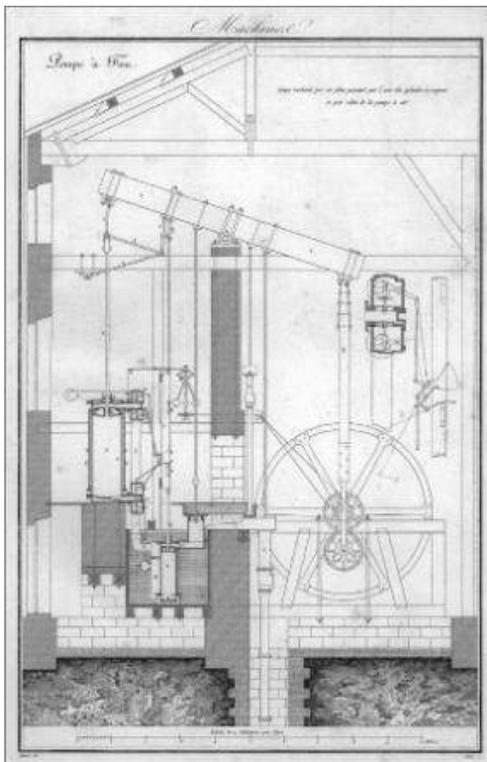
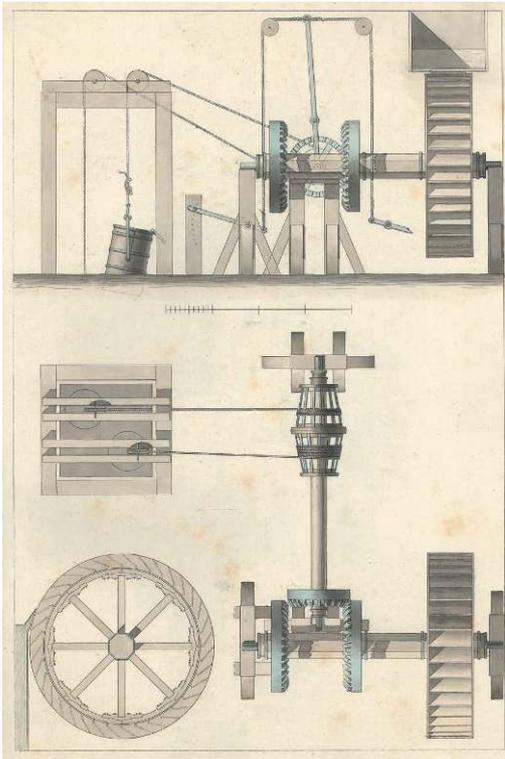


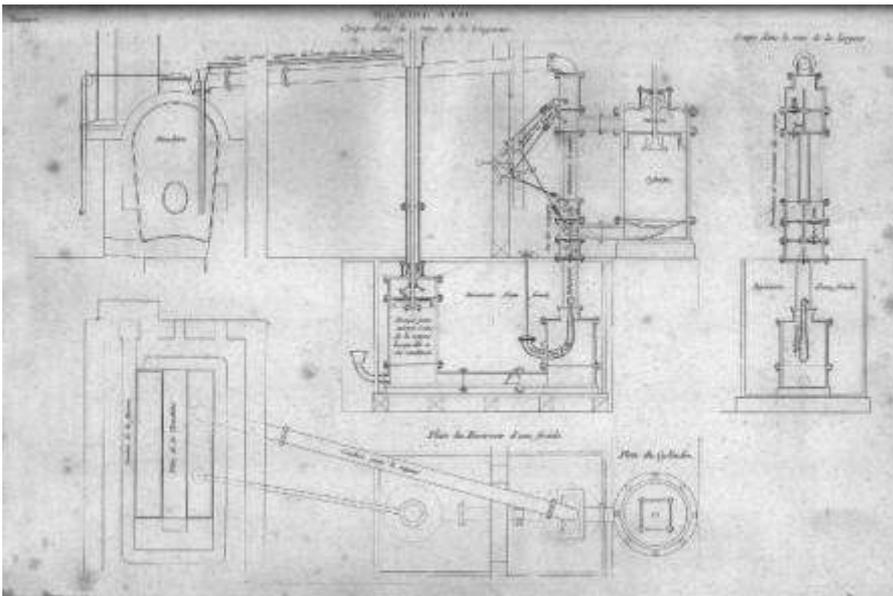
Planche 5 : *Machine servant à l'extraction des mines – Treuil*
Hassenfratz - AEP : Epures 1794-1850 - lavis couleurs sur planche
imprimée [24 x 36,5 cm]

- 25 Le cours d'Exploitation des mines devait comprendre, d'après le projet de Hassenfratz, des leçons orales et des travaux graphiques. Deux lavis conservés aux archives concernent ce domaine : un bocard (broyeur à minerai) en perspective et le dessin présenté ici, mise en couleurs d'une planche qui a pu être distribuée à cette époque. Des dessins d'élèves subsistent par ailleurs, représentant notamment hauts fourneaux et roues hydrauliques, sans qu'on puisse préciser la nature exacte des travaux demandés, ni les années correspondantes ; il n'est pas sûr, en effet, que ce cours ait eu le temps de se stabiliser dans sa forme, avant de se réduire et de disparaître. Le dessin présenté ici est très caractéristique, tout à la fois du dessin d'ingénieur au tournant du siècle et des techniques mécaniques du travail des mines de cette époque.
- 26 Le lavis couleur est une technique de description de machine, où l'aquarelle permet d'indiquer les volumes et les matériaux, afin de présenter une image aussi proche que possible du réel. Dessin technique pour non spécialiste en quelque sorte, c'est un procédé qu'utilisera largement le portefeuille industriel constitué aux débuts du Conservatoire des Arts et Métiers. Au cours du XIXe siècle, le dessin industriel va évoluer vers une forme plus conventionnelle, mais l'enseignement du lavis persistera encore très longtemps à l'Ecole. Comparer avec les **planches 6 et 21** d'une part, les **planches 22, 23 et 25** d'autre part.
- 27 L'installation proposée comporte une roue hydraulique d'axe horizontal, alimentée par le dessus (à droite des deux vues principales, complétées par une vue de côté située en bas à gauche). Celle-ci entraîne un arbre muni de deux roues dentées coniques. Une commande par levier et poulies permet d'inverser le sens de rotation du treuil, lui aussi horizontal (ce sous-ensemble est incomplètement défini). Le tambour biconique permet d'entraîner par cordages deux récipients, l'un en montée et l'autre en descente, ou inversement. Outre le moteur hydraulique, différents éléments de machines sont ici présents : renvoi d'angle, inverseur de marche.

Machine servant à l'extraction des mines - Treuil



Mines : machine à feu



**Planche 6 : Mines. Machine à feu - Machine à double effet
Hassenfratz [?] -AEP : Epures 1794-1850 - planche imprimée [env.
26 x 40 cm]**

- 28 Les pompes actionnées à la vapeur ont été employées, tout au long des XVIIIe et XIXe siècles dans les mines, aux travaux d'exhaure, afin d'assécher les galeries souterraines. Les premiers essais, de Savery, portaient sur une machine sans piston. Puis la machine de Newcomen, actionnant des pompes ordinaires, fut mise au point en 1712, et largement exploitée - en Angleterre essentiellement. Elle fut encore améliorée par Smeaton en 1772. Cette machine est dite « atmosphérique » car l'effet moteur n'est pas associé à la vaporisation de l'eau (l'étanchéité étant trop imparfaite) mais à la condensation de la vapeur (provoquée par injection d'eau directement dans le cylindre) : la course motrice ne correspond pas à une surpression dans le cylindre mais à une dépression, la pression atmosphérique repoussant alors le piston.
- 29 La machine de Watt diffère de la machine de Newcomen par l'adjonction d'un condenseur séparé, permettant de maintenir le cylindre à une température élevée sans le refroidir à chaque cycle. La chambre contenant la vapeur étant mise en communication avec une chambre froide (immergée dans un bassin située en dessous de la machine), il se crée une aspiration de la vapeur qui se condense alors à l'extérieur du cylindre. Le brevet d'invention date de 1769 ; mais le début d'exploitation ne commence qu'en 1776, après une association avec Boulton, et grâce à la nouvelle machine à aléser de Wilkinson qui permet de fabriquer le cylindre avec la précision nécessaire.
- 30 La seconde innovation de Watt, en 1781, consiste à introduire la vapeur alternativement de chaque côté du piston, obtenant ainsi un double effet. Le fonctionnement de la machine repose alors sur la commande des soupapes d'admission et d'échappement, à partir du déplacement du piston. Voir aussi la **planche 14** de Hachette ; et comparer avec les **planches 18 et 19** de Arago, où les soupapes ont été remplacées par un tiroir de distribution.
- 31 Cette planche, sans autre mention que « Mines », représente une telle machine de Watt (à double effet). Elle peut provenir du cours de Hassenfratz (où elle aurait servi d'illustration), ou bien avoir été utilisée plus tardivement comme variante de « machine à feu ». Ce style de dessin géométral ne correspond pas aux travaux qui étaient exigés des élèves à cette époque, mais bien aux documents techniques, tels qu'ils devaient se présenter dans la construction mécanique. Le dessin industriel se généralisera au cours du XIXe siècle. Comparer avec les **planches 4 et 5**, par exemple, qui correspondent à deux autres types de représentation.
- 32 La principale vue fait apparaître à gauche la chaudière, au centre le réservoir d'eau froide, situé sous le piston qui est à droite ; cet ensemble est repris en « vue de dessus », dans la partie inférieure de la planche. La vue de côté, située à droite, montre en coupe le détail des conduits et soupapes, dont la commande est représentée en haut et au centre de la feuille (une tige verticale, reliée à un balancier non représenté, vient agir sur un système de leviers et renvois). Comparer avec la **planche 4**, et noter ici l'absence de réchauffement du cylindre.

La mise en place d'un *Cours sur les Machines*, Hachette - [1806]

- 33 Gaspard Monge est responsable du cours de Géométrie descriptive, dès le début de l'Ecole. Ce cours de première année doit comprendre l'étude théorique préliminaire (la «stéréotomie») et les applications les plus immédiates et les plus générales à la formation des ingénieurs de tous les services de l'Etat : la coupe des pierres et la charpenterie, le tracé des ombres et les perspectives, le nivellement et la topographie, les «machines simples» et les «principales machines composées» .
- 34 Mais Monge, accaparé par d'autres tâches dès 1796, n'est jamais allé jusqu'au bout de son programme et il revient à Jean Nicolas Pierre Hachette d'assurer cet enseignement, et d'en organiser les diverses applications. Il faudra ainsi attendre 1806 pour qu'ait lieu un «cours sur les Eléments de Machines» .

Planche 7 : Emploi du temps, *hebdomadaire, des vacances* [septembre 1806] Hachette - AEP : dossier III-3-a - manuscrit [36 x 23 cm]

- 35 Ce document correspond à la première session du cours de machines de l'Ecole polytechnique. De 1806 jusqu'en 1815, l'enseignement de Hachette s'effectue en octobre-novembre, »pour les élèves qui n'obtenaient pas de congés«. Cette période est en effet comprise entre la fin des examens de première année et l'ouverture officielle de l'année scolaire (avec la réception des nouveaux admis). Ce cours, rattaché à la seconde année d'étude, a lieu deux jours par semaine : une heure de leçon (certains jours), suivie de cinq heures de travaux graphiques (alternés avec des visites d'ateliers, conduites par le professeur de Physique, Hassenfratz). En 1811, cet enseignement passe de six à dix leçons.
- 36 Le programme initial de ce cours est basé sur l'étude de quelques machines jugées représentatives. Son contenu est développé en 1807, et publié en 1808 ; il traite alors des forces et de leur estimation, des machines élémentaires et de leur classification, des principales machines employées dans les constructions, des ombres et du lavis appliqués au dessin des machines.
- 37 En 1810, Hachette redéfinit complètement le programme du »cours des Machines« en l'étoffant largement. Dans le même temps, il publie son *Traité élémentaire des machines* (1811), dont une seconde édition, revue et augmentée, paraîtra en 1819 (et une dernière en 1828).

Emploi du temps

Tableau de l'emploi de temps par jour des élèves à partir de la fin des vacances jusqu'à l'ouverture de l'école, pour le plan qui est indiqué par le tableau.

Semaine	N° de l'élève	Matières						Autres		Total
		1. 2. 3. 4. 5. 6.	7. 8. 9. 10. 11. 12.	13. 14. 15. 16. 17. 18.	19. 20. 21. 22. 23. 24.	25. 26. 27. 28. 29. 30.	31. 32.			
1	1	Dessin d'architecture ou autre des machines						Dessin de figures		
2	2	Composition de plans pour machines ou autre des machines						Dessin de figures		
3	3	Dessin d'architecture ou autre des machines						Dessin de figures		
4	4	Composition de plans pour machines ou autre des machines						Dessin de figures		
5	5	Dessin d'architecture ou autre des machines						Dessin de figures		
6	6	Composition de plans pour machines ou autre des machines						Dessin de figures		

Tableau de l'emploi de temps par jour des élèves à partir de la fin des vacances jusqu'à l'ouverture de l'école, pour le plan qui est indiqué par le tableau.

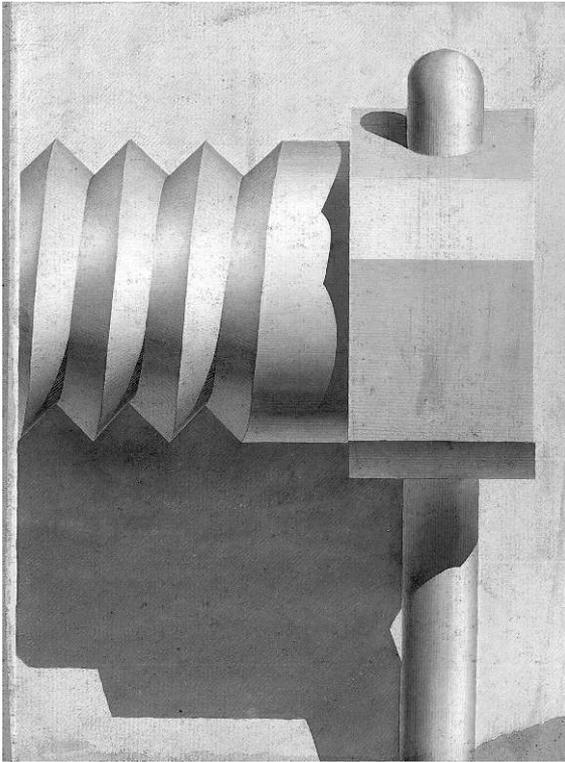
Travail demandé aux élèves, cours de Hachette - [1806 - 1815]

- 38 *Planches imprimées* = AEP : Leroy 1817-1849 ; *Epures* 1800-1816 - *Articles publiés* = CEP : tome 2, cahiers 1 et 5 (janvier 1809 et janvier 1813) - *Travaux d'élèves* = AEP : Epures 1794-1850 ; Epures 1812-1813 ; X2b 216-217, 219, 241 et 242 ; X2b Album 29.
- 39 Hachette, fidèle au programme fixé par Monge, inscrit le cours de Machines dans les applications de la Géométrie descriptive. Les travaux demandés aux élèves sont donc fondés sur des problèmes de constructions géométriques et de représentations d'éléments de machines. Que ce soit sous la forme d'épures au crayon ou de lavis en couleurs, deux types d'exercices vont apparaître : le dessin plan d'objets volumiques avec le tracé de leurs ombres, dont les filetages deviendront l'archétype ; la définition géométrique de courbes particulières avec la définition rigoureuse de leurs propriétés, dont les dentures d'engrenages profiteront largement (voir les développements donnés par Hachette dans le second chapitre de son *Traité*).
- 40 Les épures gravées de Hachette (filetages, cames et pilons, engrenages) sont regroupées avec diverses études, sous le titre «Ombres» (numérotées de 12 à 17), entre géométrie descriptive et perspectives d'une part, coupe de pierres et charpenterie d'autre part. Elles ne sont pas reprises dans son *Traité élémentaires des machines* de 1811, qui comprend par ailleurs six planches sur la «théorie des engrenages» (tracés de dentures ou de came pour pilon) et les roues coniques («machines élémentaires»).

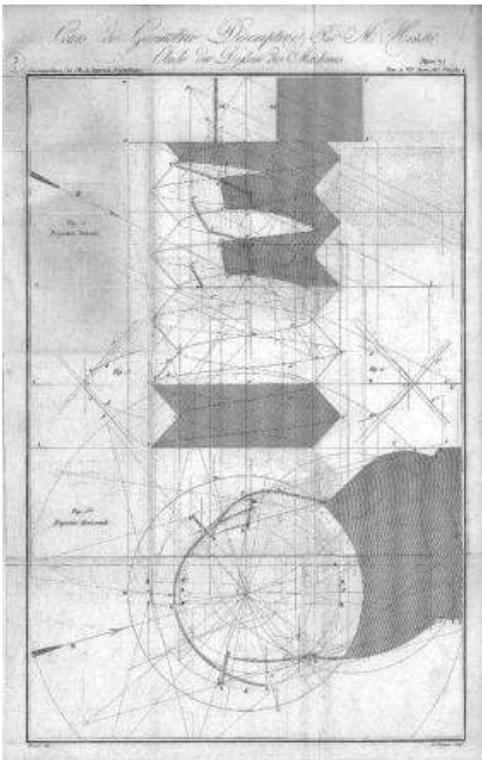
**Planches 8 et 9 : Géométrie descriptive. Tracé des ombres – Filetage
Hachette - AEP : X2b Album 29 - lavis noir et blanc [23 x 17 cm] ;
CEP : II, 5 (1813) - planche imprimée [22,5 x 35 cm]**

- 41 *Références complémentaires* = Planche de cuivre 4 (vis triangulaire) et 5 (vis carrée), gravées fin 1807. Planches imprimées 12, 13 et 14.
- 42 Le tracé des ombres était un exercice de géométrie descriptive pratiqué bien avant la mise en place du cours de Machines (dessin au crayon ou lavis). En 1797, on trouve déjà une vis parmi les différents travaux d'élèves (voir aux archives de l'ENPC, les épures d'Angion, an V). L'hélice circulaire, courbe géométrique élémentaire, se prête bien à de tels exercices, à côté des vases, piédouches et autres éléments d'architecture (voir les épures gravées de géométrie descriptive, an III, AEP). Il suffit alors d'ajouter la pièce complémentaire - l'écrou - pour obtenir «*le carré qui se meut*» (voir les épures de Bardin, élève de la promotion 13, AEP), c'est-à-dire le système vis-écrou, transformation du mouvement circulaire en mouvement rectiligne. Aussi les vis, à filet carré ou triangulaire, sont-elles parmi les premiers travaux du cours de Machines, dès 1806. La **planche 8** est une épure d'élève anonyme (comparable à celles de Villeneuve, promotion 13, ou de Dalesme, promotion 11). Noter l'art du dégradé, destiné à faire apparaître le volume : ce dessin est autant un exercice de construction géométrique que de représentation technique, tel qu'on conçoit le travail de l'ingénieur à l'époque.
- 43 Hachette poursuit en publiant, en 1809, un article intitulé «Application de la théorie des ombres au dessin des machines» .
- 44 Suivant l'exemple de Monge qui enseignait l'application de l'analyse à la géométrie, il pose le problème théoriquement. Il y revient, en 1813, dans un nouvel article : «Du dessin de la vis triangulaire, éclairée par des rayons de lumière qu'on suppose parallèles entre eux» .
- 45 La planche qui accompagne cet article sera incluse dans la collection d'épures propres à son cours ; voir la **planche 9**, dont le titre précise bien le sujet : «Etude du dessin des machines» .
- 46 Il faut souligner que ce thème répond à plusieurs approches : construction graphique, définition géométrique de courbe, conception de mécanisme de transformation de mouvement, constitution d'éléments de machines ; ce type d'exercice aura une longue vie dans le cadre de l'enseignement du dessin industriel.

Geométrie descriptive : tracé des ombres



Cours de géométrie descriptive, Hachette

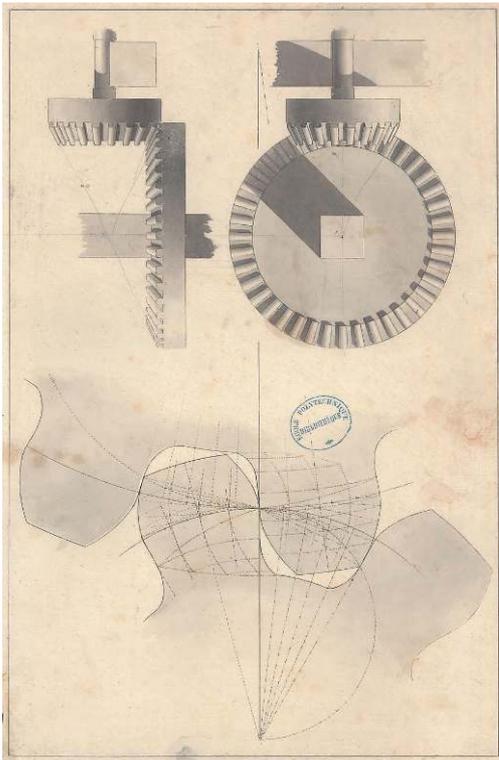


Planches 10 et 11 (pages 54 et 55) : Engrenage conique *Géométrie descriptive*. Ombres - Engrenages cylindriques à lanterne - Hachette - AEP : Epures 17941850 - lavis noir et blanc sur planche imprimée [26 x 40 cm] ; AEP : Leroy 1817-1849 - planche imprimée [23 x 37 cm]

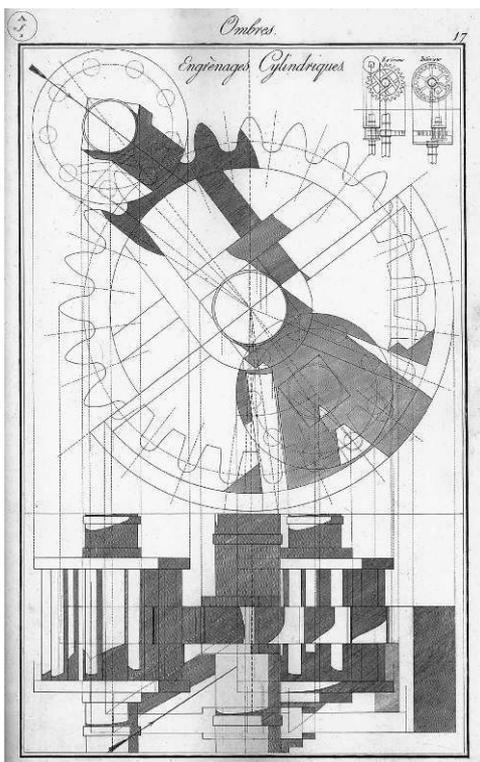
- 47 *Références complémentaires* = Planches de cuivre 11 (engrenage cylindrique) et 14 (engrenage conique), gravées fin 1807. Planche imprimée 17. Planches du *Traité* (1811) : théorie des engrenages et tracé de dentures.
- 48 Un autre élément de machines, tout aussi essentiel aux constructions mécaniques, est l'engrenage. La **planche 10** présente un couple conique, avec représentation des ombres, et tracé des dentures - dont on ne sait s'il s'agit d'un dessin d'élève ou d'une illustration de cours réalisée par le bureau des dessinateurs attaché à l'Ecole. Le dessin des roues dentées va évoluer de la représentation directe, sous forme de lavis ou d'ombres au crayon, à l'étude géométrique de l'engrènement : le programme du cours de Machines mentionne la première, et le *Traité* de Hachette s'intéresse davantage à la seconde, avec la définition des épicycloïdes tout d'abord, des développantes de cercle ensuite. La mécanique appliquée va trouver là un domaine de recherche, spécifiquement géométrique, préfigurant les études cinématiques à venir. Comparer aussi avec la **planches 20** de Savary.
- 49 Les engrenages étaient utilisés depuis longtemps dans les machines. Mais bien que leur denture ait fait l'objet d'études théoriques depuis le XVIIe siècle (voir les travaux de Desargues, de La Hire, de Camus...), leur réalisation restait élémentaire : de simples obstacles, comme des pignes cylindriques, étaient montés sur les roues, radialement ou parallèlement à l'axe ; les pignons à lanternes à fuseaux cylindriques, pouvaient alors être accouplés à des roues dont l'axe de rotation était soit parallèle soit perpendiculaire à celui du pignon (voir **planche 11**). Des considérations empiriques ont conduit à des dents de section trapézoïdale, augmentant leur résistance et atténuant les chocs. Des notions de glissement, de frottement et d'échauffement allaient modifier encore leur forme en les arrondissant, mais les procédés de fabrication restaient artisanaux (l'horlogerie étant un peu à part). La réalisation de dents en bois était manuelle - à cent lieues des études géométriques de l'engrènement. Avec l'évolution des dentures, le problème des engrenages coniques devait donc être reconsidéré (voir **planche 10**) : Hachette s'y employa, ce que soulignent Lanz et Bétancourt dans leur *Essai*.
- 50 Les engrenages étaient absents de la première version du programme de Hachette pour le «cours sur les Eléments des Machines». Mais la seconde rédaction, davantage élaborée, y remédie («cours élémentaire des Machines», session de 1807) : dessin d'un engrenage avec lanterne cylindrique (voir **planche 11**) et explication des engrenages coniques. Enfin, l'importance des engrenages apparaît en 1810 : le dernier programme de Hachette pour le «cours des Machines» mentionne la théorie des épicycloïdes planes et sphériques, et son application aux engrenages cylindriques et coniques.
- 51 Cette dernière planche, gravée fin 1807, présente un élément fondamental des machines, et introduit par la même occasion la technique des ombres propre à la géométrie descriptive. A noter les dégradés de gris, réalisés sur cuivre pour l'impression, et

comparer au travail de Dalesme, élève de la promotion 11, épure au crayon en tout point conforme au modèle.

Engrenage conique



Ombres, engrenages cylindriques



Classification des machines : Hachette, Lanz et Betancourt - [1808]

- 52 *Références* = AEP : X2b 10 (*Rapport*, 1808) et Hachette 1808 (*Programme et Essai*, 1808) ; G2a 14 (*Traité*, 1811) ; G2a 15 (*Traité*, 1819) ; Epures 1794-1850 et G2a 12 (*Essai*, 1819) ; G2a 16 (*Traité*, 1828).
- 53 Monge, dans ses *Développements sur l'enseignement adopté pour l'Ecole centrale des travaux publics* (octobre 1794), prévoit l'étude des «éléments des machines» :
- « On entend par là trouver les moyens par lesquels on change la direction des mouvements, ceux par lesquels on peut faire naître les uns des autres le mouvement progressif en ligne directe, le mouvement de rotation, le mouvement alternatif de va et vient. On sent que les machines les plus compliquées ne sont que les résultats des combinaisons de quelques-uns de ces moyens individuels, dont il faudra faire en sorte que l'énumération soit complète... »*
- 54 Les circonstances ne lui ont pas permis de poursuivre ses travaux plus avant. Néanmoins, en partant de ces indications, la »classification de Monge« voit le jour avec les travaux de Hachette d'une part, de Lanz et Bétancourt d'autre part : travaux publiés conjointement par l'Ecole polytechnique en 1808.

Planche 12 : *Cours de géométrie descriptive* - Tableau des machines élémentaires -1808 - Hachette - AEP : X2b 10 - planche imprimée [25 x 53 cm]

- 55 *Références complémentaires* = Planche de cuivre gravée fin 1807. Publications dans le *Rapport sur l'Ecole Impériale Polytechnique*, session 1807 (avril 1808) et dans le *Programme du cours élémentaire des machines*, pour l'an 1808 de Hachette, en introduction à l'*Essai sur la composition des machines* de Lanz et Bétancourt (1808). Reproductions (légèrement modifiées) dans le *Traité élémentaire des machines* de Hachette (éditions de 1811, 1819 et 1828).
- 56 *Sur le cours des machines de l'Ecole polytechnique* (1808)
- « On a joint à ce programme un tableau des machines élémentaires ; les formes sous lesquelles ces machines se présentent, sont déjà en assez grand nombre pour qu'il soit nécessaire de les ranger méthodiquement ; les observations suivantes servent de base à cet arrangement.*
1. *Les moteurs en usage dans les arts, sont appliqués à un point, pour lui faire décrire ou un cercle ou une ligne droite ; de là résultent les mouvements circulaire et rectiligne.*
2. *Le point mobile, après avoir parcouru une portion de cercle ou de droite, peut être ramené par la force motrice vers le point de départ, en décrivant la même ligne ; de là résultent les mouvements alternatifs, ou circulaires, ou rectilignes, qu'on nomme aussi mouvements de va et vient. »*
- 57 *Des machines élémentaires, et de leur division en dix séries* (1811)
- « Les quatre espèces de mouvements circulaire continu et alternatif ; rectiligne continu et alternatif, combinées deux à deux, donnent six combinaisons différentes ; de plus, chaque mouvement se combine avec lui-même ; ce qui donne encore quatre combinaisons. Ainsi il y a dix manières différentes de combiner entre eux les quatre mouvements circulaires et rectilignes, et à chacune d'elles correspond une série de machines élémentaires. » «*

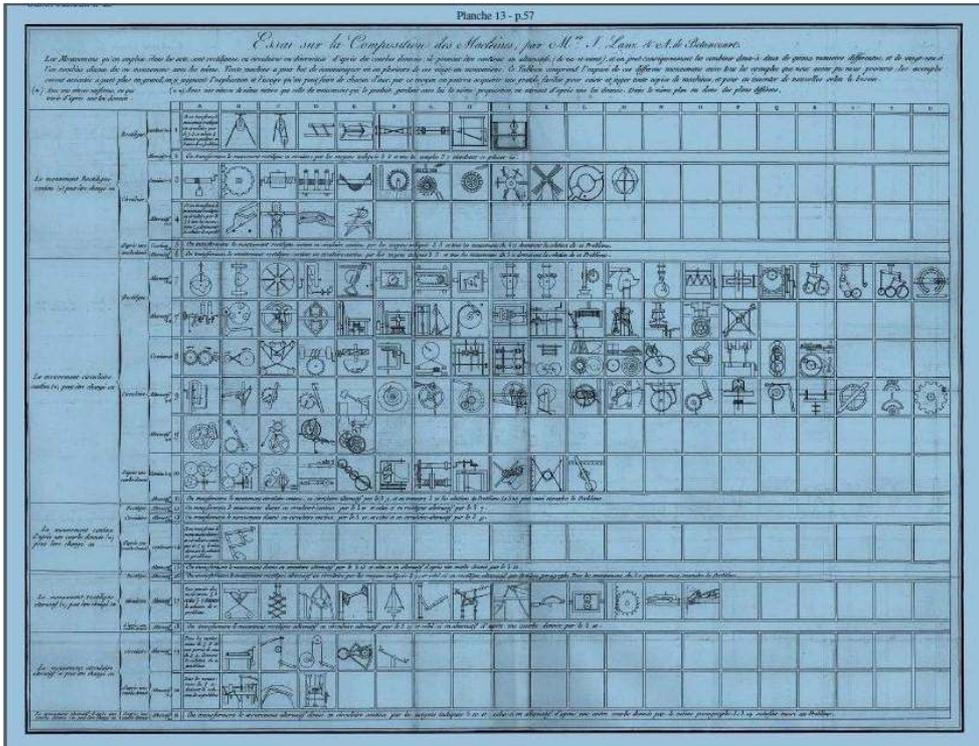
- 58 Voir les renvois des **planches 1 et 2**, et comparer avec la **planche 13**. Les moteurs sont classés dans la transformation du mouvement rectiligne (« l'eau ou le vent agissant en ligne droite ») en mouvement circulaire : moulin à vent (vignettes 3a-B, 3a-C, 3a-D, 3a-D et 3a-E) et roues hydrauliques (vignettes 3b-A, 3b-B, 3b-C et 3b-E) auxquels on peut ajouter les pendules hydrauliques (vignettes 4-A et 4-D). Les machines à élever l'eau sont présentées aux vignettes 1-D (béliet hydraulique), 1-E (fontaine de Héron), 3b-D (vis d'Archimède) ; les mécanismes d'entraînement manuel, aux vignettes 9-E et 9a-A (forets), 7-C, 7-D et 10-C (pédales). La vignette 4-C (bateau à l'ancre), illustrant un moyen de transbordement, est classée dans la transformation d'un mouvement rectiligne continu (celui de l'eau) en un mouvement circulaire alternatif (celui du bateau, par le jeu de son gouvernail). Noter les systèmes à poulies ou à chaîne, et les nombreuses roues dentées (dont certaines partiellement), ainsi que les différents mécanismes à levier, dont ceux de Lagaroust (vignettes 4-B, 7a-D, 7a-E et 7b-A), les échappements (vignettes 7b-D, 7b-E, 7c-A et 7c-B) et les mécanismes à détente ou à rochet (vignettes 5d-A, 7a-A, 7b-B, 10-A). Remarquer les vignettes 5b-C (bielle-manivelle), 5c-A (planétaire dit de White) et 7-E (mouche dite de Watt), 9a-C et 9a-D (parallélogramme dit de Watt, et variante). Comparer la vignette 10-D (accouplement par crabotage) avec la vignette 7'-I de la **planche 13**, et remarquer la différence de classement : le problème d'une liaison temporaire en rotation (et de sa commande par levier) entre mal dans ce type de classification.

**Planche 13 : *Essai sur la composition des machines* - Tableau général
- 1808 – Lanz & Bétancourt - AEP : Hachette 1808 - planche
imprimée [44 x 34 cm]**

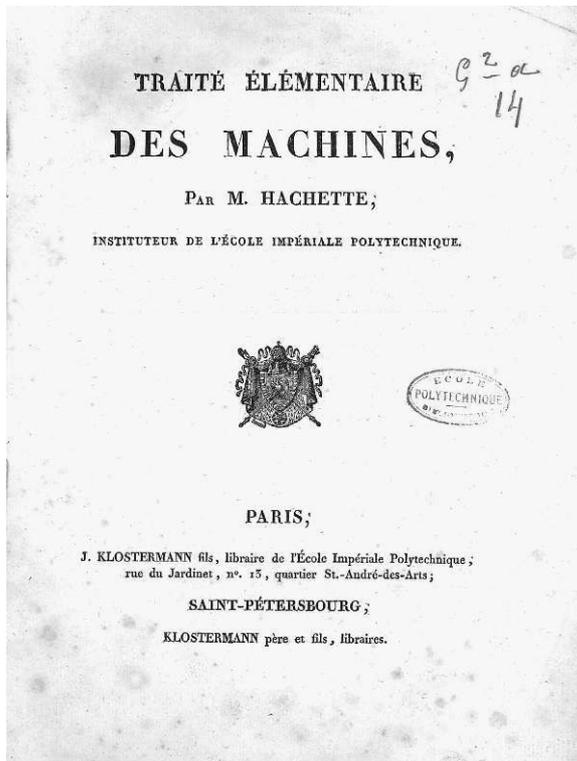
- 59 *Références complémentaires* = Planche de cuivre gravée fin 1807. Publication par l'Ecole impériale polytechnique de *l'Essai sur la composition des machines* de Lanz et Bétancourt, précédé du *Programme du cours élémentaire des machines, pour l'an 1808* de Hachette (1808). Deuxième édition (augmentée) de *l'Essai sur la composition des machines* de Lanz et Bétancourt (1819).
- 60 Aux quatre mouvements précédents, rectilignes et circulaires, les auteurs rajoutent les « mouvements déterminés selon une courbe donnée », ce qui les amène à six mouvements simples, continus ou alternatifs. Comparant les mouvements d'entrée et de sortie de ces mécanismes, ils aboutissent ainsi à vingt et une combinaisons élémentaires - dont onze sont effectivement attestées du point de vue technologique.
- 61 Les autres transformations de mouvement peuvent alors être obtenues par association. Par exemple, lorsque Hachette reconnaît qu'il n'existe pas de mécanisme transformant un mouvement rectiligne continu en mouvement rectiligne alternatif, Lanz et Bétancourt proposent de transformer tout d'abord le mouvement initial en mouvement circulaire continu, puis ce dernier en mouvement du type désiré - à l'aide de deux mécanismes existant, associés en série.
- 62 La classification de Lanz et Bétancourt est basée sur les mêmes principes que celle de Hachette - c'est-à-dire sur ceux de Monge -, et en étendant la définition des mouvements de base, ils peuvent recenser davantage de « machines élémentaires » que celui-ci. Mais surtout, par ce principe d'association, ils ouvrent la voie à une logique de la construction de machines complexes.

63 Voir les renvois des **planches 1 et 2**, et comparer avec la **planche 12**. Bien que de nombreuses vignettes soient identiques sur les deux tableaux (gravés au même moment et au même endroit), on en trouve davantage sur le second ; voir la vignette 14-B (pantographe) pour les mouvements selon une courbe quelconque, et la vignette 8-O (joint brisé, dit de Cardan), pour une application au télégraphe attribuée à Bétancourt et Bréguet ; comparer la vignette 7'-N (régulateur à boules, décrit ici dans le cas de moulin à vent, avant que Watt ne l'utilise pour la commande des machines à vapeur) avec le mécanisme à effet centrifuge de Hachette (vignette 5d-B de la **planche 12**).

Essai sur la composition des machines



Traité élémentaire des machines, Hachette



Planches du cours de Hachette, *Traité élémentaire des machines* - [1811]

- 64 *Références* = AEP : G2a 14 (*Traité*, 1811) ; G2a 15 (*Traité* 1819) ; G2a 16 (*Traité* 1828).
- 65 Conformément au programme de Monge, le cours de Hachette commence par l'étude des «éléments de machines», avant d'aborder celle des «principales machines employées dans les travaux publics», ou dans les arts en général. Les «machines simples» de la rédaction initiale sont devenues «machines élémentaires», afin de souligner le point de vue géométrique de la transformation de mouvement, comme il apparaît dans les **planches 12 et 13**. Cet effort de classification conduit à une présentation qui regroupe les mécanismes et les moteurs - sans pour autant les différencier clairement.
- 66 Pourtant, à en juger par le *Traité élémentaire des machines*, l'essentiel réside dans «l'exposé des principes généraux, soit de Géométrie ou de Mécanique, qui servent de base à la construction des Machines et à la comparaison de leurs effets» (1819)
- 67 Le premier chapitre de cet ouvrage est principalement consacré à «la description et l'explication de toutes les machines connues, qui reçoivent directement l'action de l'un des trois moteurs : eau, vent, combustible» (1811). Si le tableau général des machines élémentaires reste toujours fondamental pour l'enseignement, les développements du cours sont ailleurs, dans la recherche du « rapport entre la force dépensée et l'effet dynamique produit par cette force » ce qui nécessite des définitions, préalablement à toute évaluation.
- 68 La description des «pompes à feu» apparaît dans les programmes dès le début du cours de Machines, et sera conservée jusqu'à la fin ; ces machines sont déjà connues en France,

mais leur utilisation est encore peu répandue. Les roues hydrauliques forment toujours l'essentiel des »moteurs inanimés« dans l'industrie ; leur étude conserve donc son importance, d'autant plus que l'on passe de l'expérimentation aux recherches théoriques sur le »calcul des effets des forces« et à la comparaison des machines - voir les ouvrages de Lazare Carnot (1783, 1803). Quant à l'ancienne machine de Marly, machinerie quelque peu désuète à l'époque, elle a encore une grande renommée ; cela permet d'aborder de nombreux problèmes techniques, à partir d'un problème concret de grande ampleur : élévation de l'eau, pompes aspirantes et foulantes, mécanisme de transmission du mouvement, moteurs hydrauliques.

- 69 On notera par ailleurs la différence de style de ces deux planches, tirées du même ouvrage. Réalisées à quelques temps d'écart, la première a son origine dans des ouvrages antérieurs, pendant que la seconde reflète son ambition pédagogique.

**Planche 14 : Cours de géométrie descriptive. Machines servant aux constructions - Dessin servant à l'explication des pompes à feu
Hachette - AEP : G2a 15 - planche imprimée [23 x 35,5 cm]**

- 70 *Références complémentaires* = Planche de cuivre numéro 2, répertoriée en juin 1807. Planche 12 (ou 15) du premier chapitre du *Traité élémentaire des machines* de 1811 (ou de 1819).
- 71 Vers la fin du siècle, les frères Périer font connaître en France les machines de Watt, et leurs installations parisiennes sont exemplaires : fonderie de Chaillot, qui fera partie des établissements régulièrement visités par les élèves de l'Ecole ; pompes du Gros-Caillou, qui fonctionneront de 1788 à 1858 pour l'alimentation de la ville en eau ; minoterie de l'Île des Cygnes, qui introduisent les machines de rotation (voir la **planche 4** de Prony).
- 72 Les ateliers de Chaillot utilisaient des machines à vapeur pour actionner des pompes ; l'eau de la Seine, ainsi élevée, entraînait à son tour des roues hydrauliques, qui mettaient en mouvement les machines de la forerie, où seront construits de nombreux canons, et autres outillages nécessaires à la construction des chaudières et cylindres de machines à vapeur.

«La Machine à feu de Watt, établie par MM. Périer à Chaillot, (années 1780-1788), est à simple effet ; le dessin a pour objet de faire connaître les parties principales de cette Machine [...] ; le même dessin, avec quelques modifications, servira pour l'explication des Machines à double effet ; il se compose de deux parties, le plan (fig. 1), et la coupe (fig. 2).

La coupe (fig. 2) représente, en allant de gauche à droite, 1/le cylindre à vapeur (A) ; 2/le condenseur (B) ; 3/la pompe (C) du condenseur ; 4/ une pompe (D) aspirante et foulante ; 5/le réservoir d'air comprimé (E) de la pompe (D).

Les tiges des pistons du cylindre (A) et des pompes (C) et (D) sont attachées par des chaînes au même levier opqr ; la tige GH du premier piston est un moteur secondaire, dont l'action est transmis par ce levier à la résistance qu'on veut y appliquer. Cette résistance, dans le cas particulier que nous examinons, a pour objet d'élever l'eau de la Seine au moyen d'une pompe (D), qui n'appartient pas à la Machine à feu.

La vapeur sort de la chaudière par le tuyau dont la section circulaire est F (fig. 2), s'introduit dans le cylindre (A), et fait descendre le piston G.

Le condenseur (B) est un tuyau cylindrique qui se prolonge en KK [...] et communique avec deux autres tubes LM et NO, l'un qui s'appelle le reniflard, l'autre l'injecteur ; [...] l'objet de la pompe à air (C) est de retirer du condenseur (B)-KK' l'eau d'injection, et l'air qui s'est dégagé de cet eau.

[...] On voit que dans cette Machine, le mouvement du piston dans le corps de pompe, ne produit d'effet utile que lorsqu'il descend ; dans le temps que cette vapeur passe du dessus au dessous du piston G, c'est le contrepoids D qui relève ce piston, et l'élévation des eaux dans la

conduite RST, n'est continue que par la réaction de l'air qui a été comprimé dans le réservoir en fonte de fer SE. Si le levier ropq communiquait son mouvement à une roue, et qu'il fallût surmonter une résistance constante appliquée à l'arbre de cette roue, alors on emploierait une Machine à feu à double effet, et on substituerait au condenseur simple (fig. 2), le condenseur double BB« (fig. 3). »

- 73 Remarquer le balancier « à tête de cheval », dont les chaînes sont associées à une machine à simple effet. Noter les additions : figure (a), principe du régulateur centrifuge ; figure (b), coupe d'un fourneau fumivore (en cartouche). Comparer avec les **planches 4 et 6** (Prony et Hassenfratz) et les **planches 18 et 19** (Arago), autant pour le style de dessin que pour les détails techniques.

Cours de géométrie descriptive, Hachette

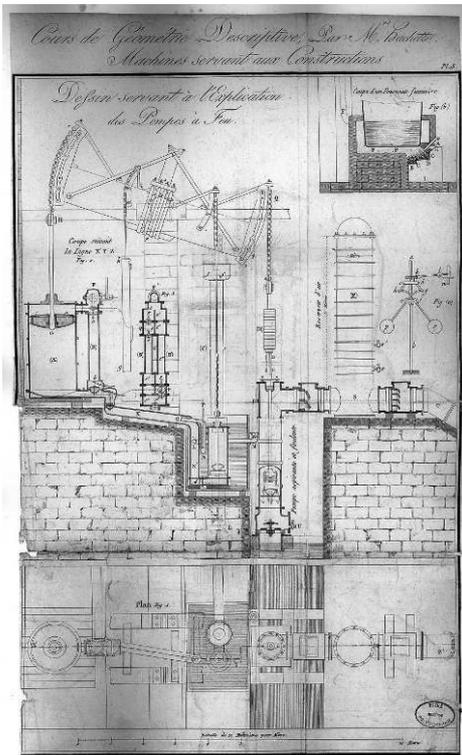


Planche 15 : Cours de géométrie descriptive. Machines - Roues hydrauliques. Machine de Marly Hachette - AEP : G2a 15 - planche imprimée [22,5 x 35 cm]

- 74 *Références complémentaires* = Planche de cuivre numéro 28, entrée à l'inventaire en 1809. Planche 10 (ou 12) du premier chapitre du *Traité élémentaire des machines* de 1811 (ou de 1819).
- 75 Sur cette planche sont regroupés différents mécanismes appartenant à des genres très différents, dont les machines hydrauliques « de première classe » et de « deuxième classe ». Les premières correspondent aux moteurs (machines mues par l'eau), et les secondes aux machines destinées à élever l'eau (roues à godets, « mise en mouvement par un moteur quelconque »). Les roues hydrauliques peuvent être « à pots ou augets » (l'eau, étant amenée par au-dessus, travaille sous l'effet de son propre poids), ou bien « à ailes ou

palettes » (l'eau, s'écoulant par en dessous, travaille du fait de sa vitesse propre) ; cette typologie élémentaire introduit un calcul simplifié du travail utile. La « roue à double rang de pots » présente une installation avec inversion du sens de rotation (selon l'ouverture des orifices du conduit d'eau) : on la trouve déjà dans des ouvrages du XVIIe siècle.

76 L'ancienne machine de Marly, établie en 1682 par Rannequin sur un bras de la Seine pour alimenter en eau les bassins du château de Versailles, était à cette époque l'objet de nombreux projets de modernisation. Finalement, Cécile et Martin la remplacèrent « provisoirement » en 1817 par deux roues hydrauliques et un nouveau système de pompes (qui fonctionneront jusqu'en 1855), et construisirent une machine à vapeur actionnant huit pompes, qui fut mise en service en 1827 (et qui restera en service jusqu'en 1859). Une dernière machine, de type hydraulique, prendra la suite jusqu'en 1963, fin définitive de cette exploitation.

77 L'installation initiale comprenait 14 roues à aubes d'une douzaine de mètres de diamètre et 253 pompes aspirantes et foulantes regroupées en trois niveaux sur le flanc de la colline, de manière à élever l'eau jusqu'à une tour située 150 mètres plus haut, et d'où partait un aqueduc vers Versailles.

« Les roues à ailes font mouvoir en même temps, et les pompes établies sur le pont, et les leviers qui communiquent le mouvement aux pompes du premier et du second puisard. »

78 Le plan (fig. 1) et l'élévation (fig. 2) détaillent le mécanisme de transmission du mouvement, à partir de la roue située à gauche, avec sa manivelle double AB et AC : bielle CK, levier coudé KL, biellette LM, levier droit MON, jusqu'aux pistons PQ et P'Q' des pompes R et R' ; bielle BD, leviers DEF et D'E« F', tringles FF'S et DD', renvoi d'angle par levier coudé STV et tringle VX vers le niveau supérieur.

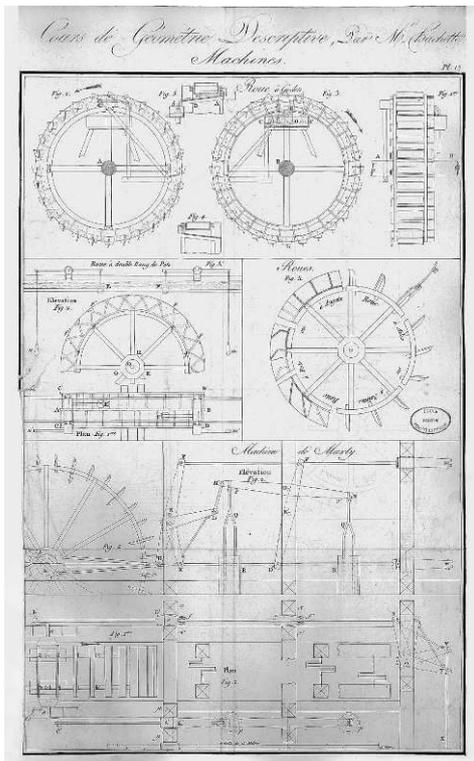
79 Cet ensemble (qui fut abandonné par la suite) était très impressionnant, très bruyant, et de faible rendement :

« une grande partie de la force motrice se détruisait sur la Machine même, et en détériorait toutes les parties. » (1819) »L'expérience de la Machine de Marly a suffisamment prouvé que la transmission du mouvement à de grandes distances par un système de leviers et de tringles, consommait en frottement une partie considérable de la force motrice. » (1811)

80 Aussi Hachette conclut-il :

« Toute les fois que les localités permettent de communiquer le mouvement à de grandes distances, par l'intermédiaire de l'eau qui remplit un canal ou un tuyau, ce moyen sera préférable à la transmission par des corps rigides, tels que les leviers, tringles, bielles, dont l'ancienne Machine de Marly était composée. »

Cours de géométrie descriptive, Hachette



Cours d'Arago - [1820 - 1830]

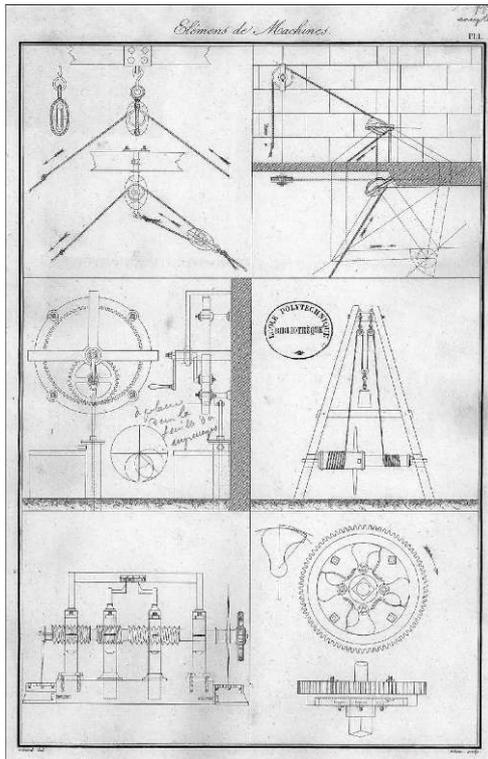
- 81 Planches imprimées = AEP : Durand 1796-1830 ; Epures 1794-1850 ; Epures 1829 ; Epures 1800-1850 - *Travaux d'élèves* = AEP : Epures 1827 ; Epures 1828/1 ; Epures 1828/war ; Epures 1829-1831 ; Epures 1830-1831 ; Epures 1830-1846.
- 82 A la réorganisation de l'Ecole qui suit la Restauration, Hachette n'est pas reconduit dans ses fonctions. L'enseignement des Machines est tout d'abord confié à Alexis Thérèse Petit, professeur de Physique ; mais il décède peu après, et laisse le Conseil de l'Ecole dans l'embarras. Finalement, François Arago, qui remplaçait Monge depuis 1809 et assurait depuis 1817 divers cours d'Analyse appliquée, en est officiellement chargé à partir de 1822. Composé de deux douzaines de leçons, le « cours de Machines » est alors intégré aux enseignements de seconde année, et le travail des élèves est assez vite organisé sur un ensemble de trois dessins aquarellés : presse hydraulique, moulin à farine, machine à vapeur de Watt.

Planches 16 et 17 : Eléments de machines, *planche 1 & planche 2*
Arago - AEP : Epures 1794-1850 - planches imprimées [22 x 34,5 cm] et [22,5 x 35 cm]

- 83 Cette présentation de machines élémentaires est beaucoup plus succincte que celle de Hachette, qui s'appuyait sur le tableau de la **planche 12**. Elle se présente dans une forme très comparable aux dessins présentés dans *l'Essai* de Lanz et Bétancourt (1808 et 1819), qui reproduisait à plus grande échelle et avec détails les vignettes du tableau de la

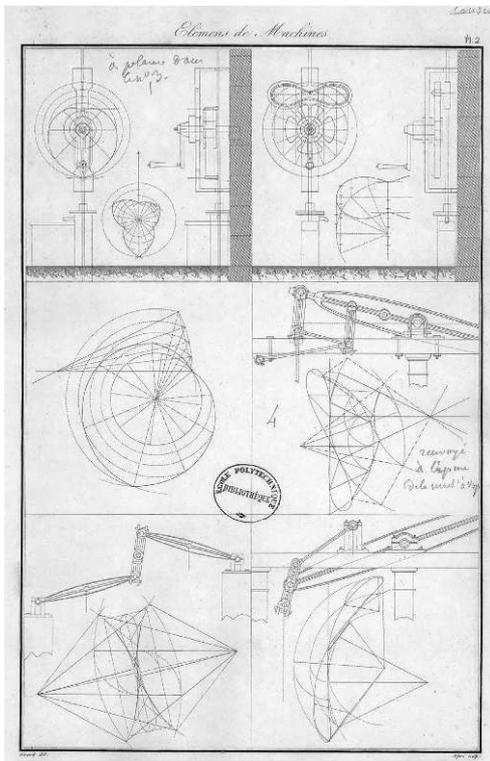
planche 13 - et parfois les reprend même très exactement. Ces planches de Arago (pl. 1 et pl. 2) étaient suivies de deux autres, sur les engrenages (pl. 3) et sur les échappements (pl. 4). Les deux premières ont été utilisées par Savary, du moins un certain temps, pendant qu'il regroupait les deux dernières (voir **planche 20**). Ces documents étaient commentés et remis aux élèves, qui les reproduisaient (cf dessins d'élèves, promotions 25, 26 et 29), exercice préliminaire aux épures de machines proprement dites.

Eléments de machines : planche 1 :



- 84 Poulie simple et moufle (cf vignette 1-A, **planche 12** ; vignettes 1-B et 1-C, **planche 13**) - Poulies de renvois (cf vignettes 1-B de la **planche 12**).
- 85 Dès le début de son enseignement, Hachette consacre une planche entière aux noeuds et cordages.
«Dans [presque] toutes ces Machines [employées dans les constructions] la transmission du mouvement se fait par des cordages ou câbles qui sont composées de fils de lin ou de chanvre. »
- 86 Voir aussi le *Traité de Statique* de Monge, et l'importance de la »machine funiculaire« pour les études de forces.
- 87 Train planétaire de White, ou de La Hire (cf vignette 5c-A, **planche 12** ; vignette 7-Q, **planche 13**) : mécanisme transformant un mouvement circulaire continu en mouvement rectiligne alternatif - Treuil différentiel (voir le dessin 3-P de la deuxième édition de l'Essai, 1819) - Micromètre de Prony à vis différentielle (cf vignette 3a-A, **planche 12** ; vignette 3-D, **planche 13**) - Mécanisme dit à roue libre.

Eléments de machines : planche 2 :



- 88 *Systèmes à came*, et tracés géométriques des «courbes en coeur» ; transformation d'un mouvement circulaire continu en mouvement rectiligne alternatif. Voir **planche 12**, vignettes 5-A et 5-B (courbes en coeur) ou **planche 13**, vignettes 7-A et 7-B (et les dessins correspondant de l'Essai).
- 89 *Systèmes articulés*, et constructions géométriques des trajectoires : parallélogramme de Watt, variante de Bétancourt, autre variante (cf vignettes 9a-C et 9a-D, **planche 12** et vignettes 17-H, 17-I et 17-O, **planche 13**). Ces mécanismes furent utilisés dans les machines à vapeur à double effet, pour passer d'un «mouvement alternatif rectiligne» à un «mouvement circulaire continu» ; on peut remarquer sur les épures que la trajectoire rectiligne n'est qu'approximative, limitée à une portion réduite (voir la partie centrale de l'espèce de huit) ; l'inverseur de Peaucellier fournira, en 1864, une solution théoriquement exacte, mais technologiquement moins performante (notamment plus encombrante).

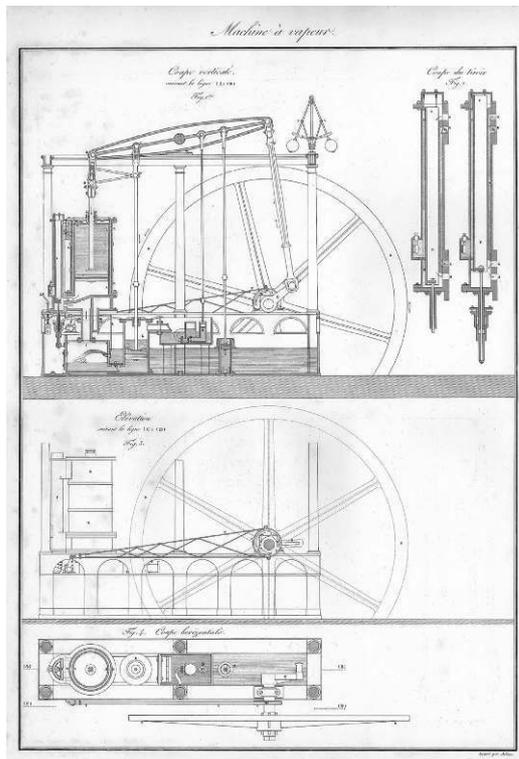
Planches 18 et 19 : Machine à vapeur de Watt (*dessin numéro 7*)
Arago - AEP : Epures 1794-1850 - planche imprimée [32 x 45 cm] et
légende [env. 21 x 33 cm]

- 90 A l'expiration du brevet de Watt et Boulton - qui avait été exceptionnellement prolongé (de 25 ans) jusqu'en 1800 - de nouveaux types de machines à vapeur apparaissent : machine à haute pression et sans condenseur de Trevithick, machine à double détente de Hornblower... En 1811, la machine de Woolf à double expansion, dite «compound», est au point en Grande-Bretagne. Son associé Edwards émigre en France en 1815 ; il reprend à son compte les établissements de Chaillot en 1818. Les essais de cette nouvelle machine à

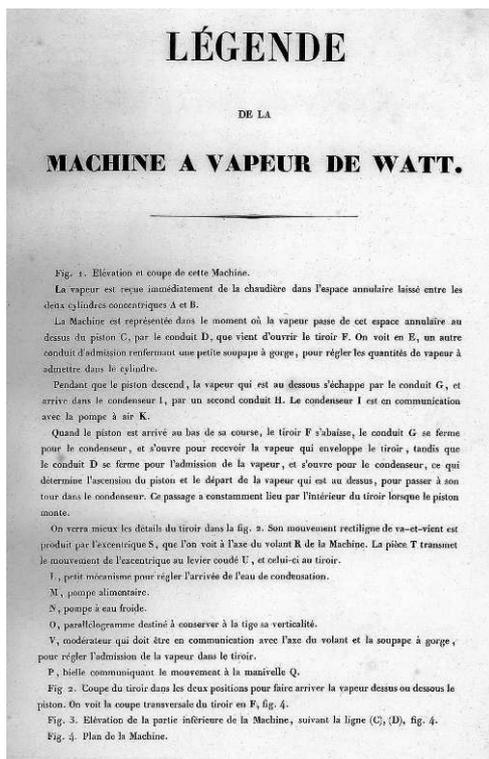
deux cylindres, établie au Gros-Cailou pour la distribution des eaux de la Seine, sont rapportés par Hachette dans la seconde édition de son *Traité*, en comparaison à la machine de Watt. Mais l'exploitant conteste au constructeur le caractère économique de sa machine, et il s'en suit un procès qui n'aboutira qu'en 1826. Appelé en expertise, Prony mettra au point son frein dynamométrique (1821).

- 91 Malgré ces innovations, la machine de Watt à double effet, permettant un entraînement en rotation, reste la référence - et ceci d'autant plus que la diffusion de la machine à vapeur dans les fabriques et ateliers industriels ne commencera vraiment en France qu'après 1830.
- 92 La machine, présentée ici, est d'une autre facture que les précédentes machines à vapeur (voir la **planche 4** de Prony). Dans sa forme, d'abord : coupe verticale (en haut), élévation et plan (en dessous), détail du tiroir (à droite) - dont la rigueur est contredite par quelques détails »réalistes« (voir le jaillissement d'eau, qu'accentuera encore le coloriage des élèves). Par la technologie qu'elle manifeste, ensuite : voir le bâti en structure tubulaire, le balancier en fonte et le parallélogramme O, le volant d'inertie (roue R de grand diamètre) entraîné par une bielle P et une manivelle Q, les tringles des pompes auxiliaires K, M et N, l'excentrique S et la bielle T (constituée d'un assemblage de fers plats) pour la commande de distribution... Enfin, la légende imprimée fournit la description du fonctionnement du moteur : passage de la vapeur du cylindre A au condenseur I, rôle du tiroir F... Comparer aussi avec la **planche 6** de Hassenfratz et la **planche 14** de Hachette.
- 93 Il est surprenant que ce dessin (**planche 18**) se retrouve - sous une forme pratiquement identique - dans de très nombreux ouvrages, dès les années vingt et tout au long du siècle (voire au delà) : traités, manuels, encyclopédies diverses...
- 94 Cette planche imprimée était fournie aux élèves pour qu'ils en fassent une copie (colorisée), de la même manière que pour la presse hydraulique ou le moulin à blé. Quelques détails ne sont pourtant pas entièrement définis, comme le régulateur à boules, en haut et à droite,
- «modérateur qui doit être en communication avec l'axe du volant et la soupape à gorge, pour régler l'admission de la vapeur dans le tiroir» (voir légende, **planche 19**) ;
- 95 les élèves ne compléteront pas toujours ce mécanisme dans leur épure (cf dessins des promotions 25, 26 et 29). Ce type de travail sera modifié par Savary (voir les **planches 21, 22 et 23**).

Machine à vapeur



Légende de la machine à vapeur



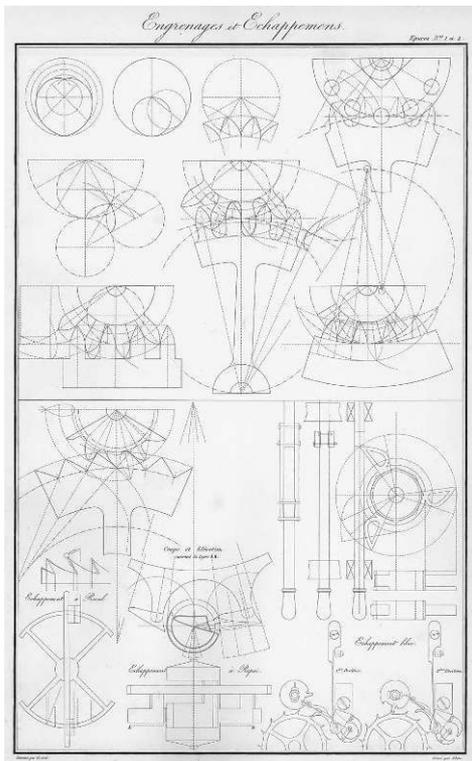
Cours de Savary - [1831 - 1840]

- 96 *Planches imprimées* = AEP : Epures 1794-1850 ; Epures 1800-1850 - *Travaux d'élèves* = AEP : Epures 1833 ; Epures 1833/lai ; Epures 1833-1834 ; Epures 1835-1836 ; Epures 1838-1839.
- 97 Arago démissionne en 1830, pour se consacrer à la politique (il est député) et à l'Académie des Sciences (il en est le secrétaire perpétuel). Félix Savary, qui était son répétiteur depuis 1828, lui succède dans tous ses enseignements : Astronomie et Géodésie, Machines, Arithmétique Sociale. Le programme du cours de Machines est revu en 1834, développé et mieux structuré ; son volume horaire augmente. Les travaux des élèves sont aussi transformés : après un premier dessin d'engrenage (dont l'importance s'accroît alors dans les industries mécaniques), les études de machines sont exécutées à partir de modèles ou de plan cotés - et ne sont plus de simples travaux de copie.

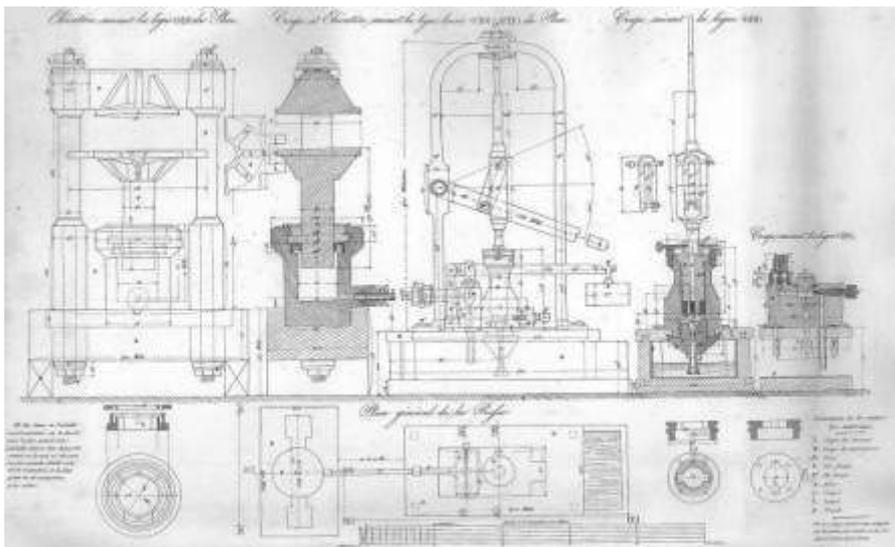
Planche 20 : Engrenage et échappement, *Epures 1 et 2 Savary* - AEP : Epures 1794-1850 - planche imprimée [22 x 35 cm]

- 98 Sur ce premier document de machines élémentaires, Savary regroupe les planches 3 et 4 de Arago concernant les engrenages et les échappements ; il abandonnera par la suite les planches 1 et 2 de ce dernier (voir les **planches 16 et 17**). Le travail des élèves comporte, comme exercice préliminaire (cf promotions 31 et 32), la copie de cette planche (épure 1 et épure 2).
- 99 La description des éléments de machines se concentre sur les engrenages et les crémaillères, les cames et les échappements (voir la **planche 20**). Cette étude porte sur la définition géométrique de mécanismes fortement inspirés de l'horlogerie et de la mécanique de précision. La petite mécanique, où les métaux ont été utilisés bien plus tôt qu'ailleurs, utilise des moyens de fabrication qui permettent de prendre en compte les notions rigoureuses de profil.
- 100 Par la suite (cf promotions 34, 37, et 42), le travail demandé aux élèves se déplace vers la conception d'un engrenage, incluant des notions de technologie sur les «roues et pignons, en fer fondu ou en bois».
- 101 Ce type de projet sera poursuivi par Chasles : la première partie de son *Instruction sur le dessin des machines* (1849) concerne les engrenages, leur description et leur dimensionnement. Suit une comparaison des dentures :
 «Aussi, quoique l'épicycloïde ait été exclusivement employée autrefois, et fort répandue encore aujourd'hui, et la développante, au contraire, fort peu employée aujourd'hui, cette dernière le sera exclusivement, quand les mécaniciens seront familiarisés avec ses avantages».
- 102 Tracé de courbe en coeur, pour came - Construction géométriques d'épicycloïde et de développante de cercle, pour denture d'engrenage - Roues et pignons à engrènement extérieur ou intérieur - Ensemble pignon et crémaillère - Pignon à lanterne - Mécanismes d'horlogerie : échappements à recul, à repos, libre - Commande de mouvement rectiligne alternatif par came (voir le marteau-pilon de la vignette 5b-B de la **planche 12**). Comparer avec les **planches 10 et 11** de Hachette (tracés d'engrenages), la **planche 17** de Arago (constructions géométriques d'éléments de machines).

Engrenages et échappements



Plan général de la presse

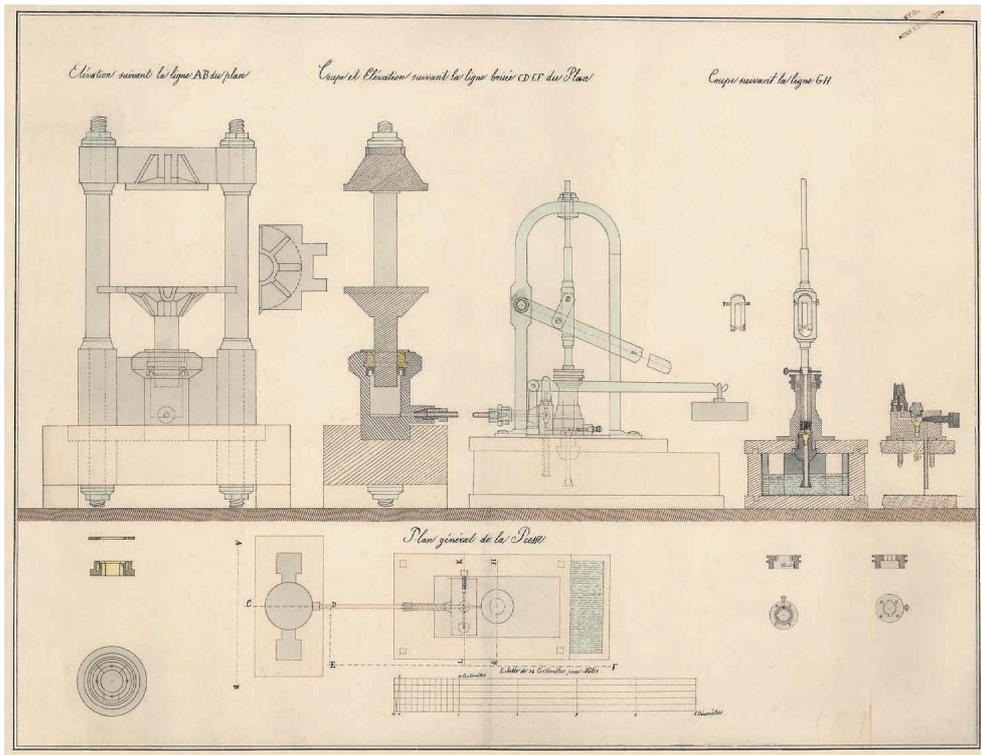


Planches 21, 22 et 23 : Presse hydraulique Savary - AEP : Epures 1794-1850 - planche imprimée [env. 37 x 29 cm] ; AEP : Epures 1833-1834 (A. Huet, promotion 32) - dessin aquarellé couleurs [55 x 42 cm] et lavis noir et blanc [25 x 38,5 cm]

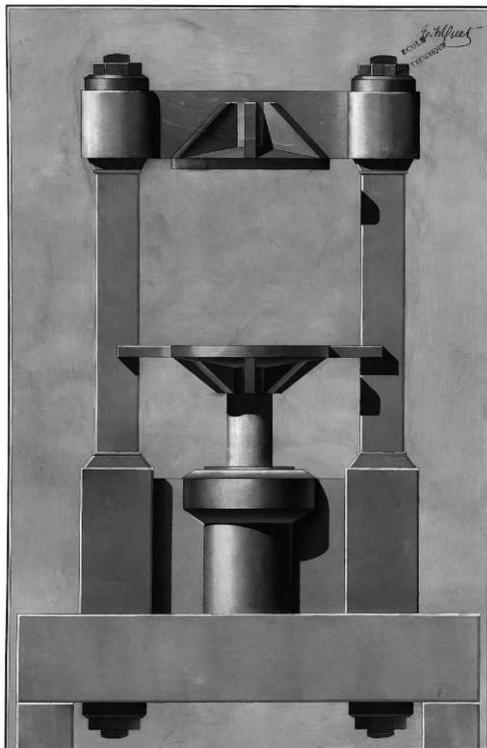
- 103 La presse hydraulique reste au programme des principales machines étudiées par les élèves. Mais le dessin de Arago est remplacé par celui de la **planche 21** : il s'agit maintenant d'un plan coté, dont la forme est beaucoup plus proche du dessin industriel (comparer avec la **planche 6**), toutes les dimensions nécessaires à la fabrication de la machine étant indiquées. Sa lecture étant plus difficile pour un non initié, elle fait l'objet d'un premier travail de lecture de plan, associée à une réécriture (dessin aquarellé de la **planche 22**). Mais le même objet peut également donner lieu à une représentation d'un type plus traditionnel (lavis de la **planche 23**), le traduisant dans une forme interprétable par des non spécialistes.
- 104 Ces deux genres de travaux sont distincts (cf épures des promotions 31, 32, 34 et 37), et sont appliqués à toute sorte de machines : la presse, la machine à vapeur (dont le dessin d'un modèle à haute pression est renouvelé par Savary), les divers moteurs hydrauliques (voir aussi les **planches 24 et 25**, travaux d'élèves du cours de Chasles, réalisés à partir de modèles), les machines employées sur les chantiers... Quant au matériel utilisé, il évolue vers les documents «authentiques», ou bien les machines réelles, dont il faut effectuer le relevé.
- «En 1796, M. Bramah de Londres, prit une patente, comme inventeur d'une nouvelle Machine, fondée sur le principe hydrostatique de Pascal»(Hachette, 1811).*
- 105 Ce dernier établit qu'un liquide (de l'eau, et plus tard de l'huile) étant sous pression, les efforts appliqués sur un piston sont proportionnels à sa section ; en utilisant alors des cylindres de dimensions différentes, on peut obtenir une multiplication de force assez importante. La réalisation pratique ne fut possible qu'une fois résolu le problème de l'étanchéité, à l'aide d'un joint de cuir embouti monté sur un disque métallique. Cette machine fut aussitôt introduite en France par Périer et Bétancourt, qui prirent un brevet d'importation en 1797. Mais son emploi fut longtemps réservé à des opérations exigeant une grande puissance, l'amortissement du prix de l'installation étant difficile.
- 106 Les deux parties de la vue centrale (élévation avec coupe partielle) montrent : à gauche la presse proprement dite, et ses deux mâchoires (celle du haut étant fixe, celle du bas est mise en mouvement sous la pression de l'eau introduite dans le cylindre inférieur) ; à droite, le mécanisme de levier, actionnant la pompe située en dessous (et dont le détail est figuré en coupe sur la vue de côté, à droite). La vue située à l'extrême gauche représente la presse, en vue extérieure de côté ; elle sera reproduite, sous forme de silhouette, sur une autre planche gravée, pour servir d'esquisse au dessin lavé demandé aux élèves. La vue de dessus situé en bas du plan fait apparaître les deux parties principales de cette machine, pendant que diverses vues complémentaires précisent certains détails.
- 107 A remarquer notamment : la conception générale du bâti ; le joint d'étanchéité du gros cylindre et les divers raccords coniques ; les guidages en translation de la presse et de la pompe ; la biellette d'entraînement du petit piston ; le débattement limité du levier ; la soupape de sécurité avec son poids suspendu par un crochet à l'extrémité d'un levier

horizontal (dont la conception remonte au « digesteur » de Papin, autocuiseur qu'il inventa vers 1680).

Plan général de la presse



Presse



Cours de Chasles - [1841 - 1850]

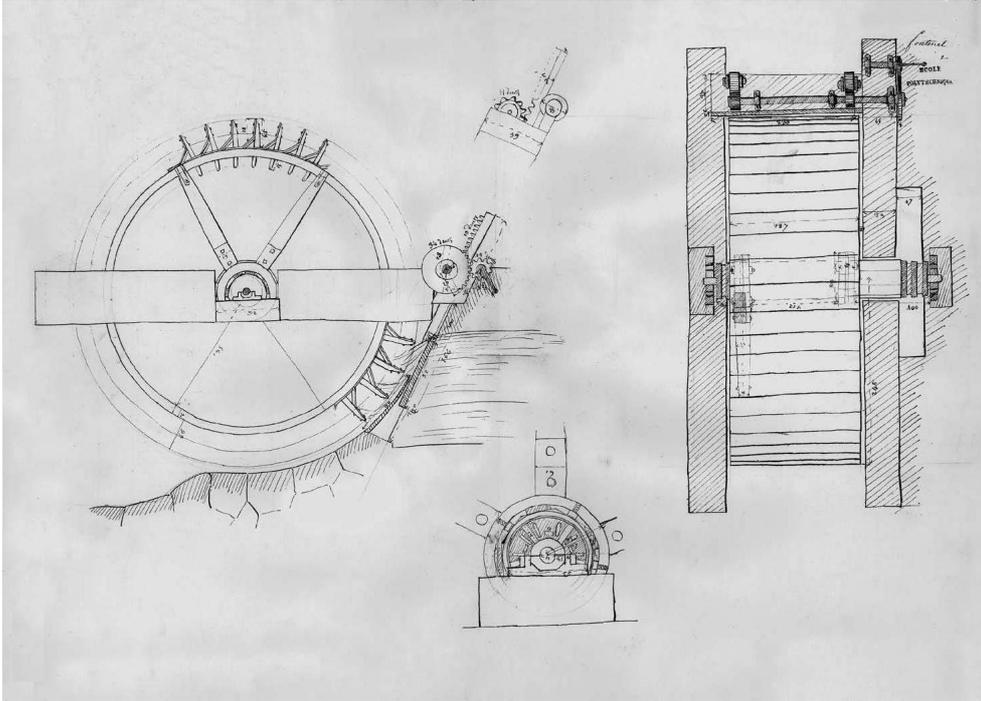
- 108 *Planches imprimées* = AEP : Epures 1794-1850 ; Epures 1800-1850 - *Instruction sur le dessin des machines* = AEP : Chasles 1849 - *Travaux d'élèves* = AEP : Epures 1843-1844 ; Epures 1847-1849.
- 109 Après le décès de Savary, Michel Chasles est nommé à sa succession, enseignant les Machines et l'Hydraulique, l'Astronomie et la Géodésie, jusqu'à la réforme de 1850. Son cours, qui fut régulièrement lithographié, prend la forme d'un cours complet de mécanique appliquée, réparti sur un peu moins d'une trentaine de leçons. Après l'étude des résistances passives, il traite de la théorie des engrenages (à laquelle correspondent trois planches imprimées). Puis les différentes machines sont étudiées, du point de vue de leur fonctionnement et de leur amélioration, de leur calcul et des constructions géométriques associées. Son enseignement, qui évolue dans le sens d'une formation à la conception, est complété par des dessins exécutés à partir de relevés sur modèles. Son *Instruction sur le dessin des machines* (1849) se présente comme un guide pour le dessin d'ingénieur : conseils et recommandations concernant les levés de machines et les croquis, la mise au net, la réalisation de lavis et le tracé des ombres.

Planches 24 et 25 : Roue hydraulique – Chasles - AEP : Epures 1847-1849 (Fontenel, promotion 47) - croquis [env. 61 x 48 cm] et lavis couleurs [42,5 x 60,5 cm]

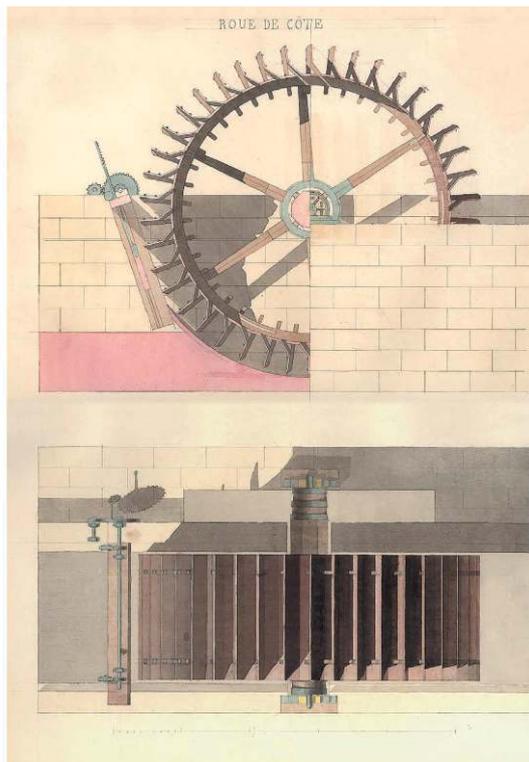
- 110 Le travail présenté ici comprend tout d'abord (**planche 24**) un croquis coté, réalisé à partir d'une maquette, d'un modèle ou d'une machine réelle en atelier ; ensuite (**planche 25**), un dessin lavé en couleurs, mise au propre du relevé précédent, dans le style du dessin d'ingénieur demandé à l'Ecole (par opposition au dessin industriel du type des constructeurs de machines). Ces dessins, réalisés par Fontenel, élève de la promotion 47, représentent une roue de côté (moteur hydraulique). Il a par la suite effectué un lavis de crémaillère (mécanisme de transformation de mouvement).
- 111 Les travaux de Tournaire, élève de la promotion 42, se composent d'un lavis d'engrenage cylindrique extérieur, suivi du croquis et du lavis d'une sonnette à battre les pieux (machine employée dans les constructions), puis d'un ensemble de trois dessins - deux croquis et un lavis - d'une turbine de Fourneyron (moteur hydraulique).
- 112 Les sujets traités restent globalement les mêmes que précédemment. Après un premier travail de projet limité à un engrenage (voir la première partie des *Instructions* : description et dimensionnement des roues dentées), les élèves abordent les ensembles complexes en commençant par l'établissement d'un croquis, relevé sur la machine étudiée ; ils poursuivent par la mise au net de cette représentation, sous la forme de lavis. Par ailleurs, la variété des modèles permet d'individualiser les travaux de chaque élève.
- 113 A côté des machines à vapeur qui commencent à se répandre, les moteurs hydrauliques restent d'importance pour l'industrie française. Leur étude théorique amène des perfectionnements notables, autorisant de bien meilleurs rendements : aubes en spirale de la roue Poncelet (1828), aubes inclinées par rapport aux rayons pour la roue Sagebien. Mais les innovations viendront des turbines, où l'axe de rotation correspond à la direction du courant. A la suite d'un concours proposé par la Société d'Encouragement à l'Industrie

nationale (association créée en 1801), Burdin rédige un mémoire en 1827 et le travail de Fourneyron aboutit à un brevet en 1832 ; de nouvelles perspectives s'ouvrent à l'énergie hydraulique.

Croquis d'une roue hydraulique



Roue de côte



114 A la suite du rattachement des Machines à la Mécanique, Chasles démissionne. Un autre enseignement va se mettre en place à l'Ecole polytechnique ; cette rétrospective s'arrête donc ici. Au cours de ces cinquante années, différents genres de travaux ont été rencontrés. Ils correspondent à des préoccupations particulières, qui se mêlent parfois sans que la distinction en soit toujours très facile ni les buts poursuivis parfaitement identifiables. On a pu trouver ainsi : des schémas à visée didactique, des études de type géométrique, des dessins de style industriel, des croquis de terrain, des représentations à rendu réaliste, etc.

115 Mais les plus « artistiques » de ces épures ont encore de beaux jours. En 1850, le *Rapport sur l'enseignement de l'Ecole polytechnique*, examinant les modifications à introduire dans l'instruction donnée aux élèves, précise ainsi les travaux graphiques qui doivent être conservés.

« Quant à l'enseignement du lavis, c'est une opinion reçue dans tous les services publics que le lavis est indispensable pour donner à la représentation des objets un caractère plus frappant, et, si on ose le dire, plus populaire. Sans doute la science des projections suffit pour donner une description fidèle des objets ; mais elle suppose, dans l'examen du dessin, un travail d'esprit auquel ceux à qui sont soumis les projets n'ont pas toujours le loisir de se livrer. Le lavis et la description des ombres sont un langage abrégé, précieux par le temps qu'il fait gagner et les méprises qu'il fait éviter. »

116 NB - On consultera avec intérêt les ouvrages suivants :

- DAUMAS, M. (dir.) : 1962-79 (réédition : 1996), *Histoire générale des techniques*, cinq volumes = le troisième tome, *L'expansion du machinisme (1725-1860)* concerne la période qui nous intéresse.
- DIDEROT & d'ALEMBERT : 1985, *L'encyclopédie. Planches et commentaires présentés par Jacques Proust* = intégrale des illustrations du *Recueil de planches...*, publié en onze volumes entre 1762 et 1772.
- PICON, Antoine & YVON, Michel : 1989, *L'ingénieur artiste. Dessins anciens de l'Ecole des Ponts et Chaussées* = lavis de machines servant aux constructions, s'échelonnant entre 1750 et 1820.
- MERCIER, Alain : 1991, *Le portefeuille de Vaucanson. Chefs d'oeuvre du dessin technique* = dessins réalisés lors de la constitution du Conservatoire des Arts et Métiers, au tournant des XVIIIe et XIXe siècles.
- CAHIERS d'HISTOIRE du CNAM (4) : 1994, *Sur l'Ecole de géométrie et de dessin du Conservatoire, dite Petite Ecole* = lavis du portefeuille industriel et dessins de machines de la première moitié du XIXe siècle.
- SAKAROVITCH, Joël : 1998, *Epures d'architectures. De la coupe des pierres à la géométrie descriptive. XVIe-XIXe siècles* = travaux de stéréotomie, perspective et ombres, datant des débuts de Polytechnique.

AUTEUR

JEAN-YVES DUPONT

Agrégé de mécanique