

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 126 (2000)
Heft: 07

Artikel: Roues hydrauliques, un regard d'ingénieur
Autor: Dubas, Michel / Schoepfer, Jean-René
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-81491>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Roues hydrauliques, un regard d'ingénieur

(GÉNIE CIVIL)

Selon le dictionnaire Robert, une machine est un «objet fabriqué, généralement complexe, destiné à transformer l'énergie et à utiliser cette transformation». Si l'on s'en tient à cette définition, la machine la plus ancienne et la plus importante dans l'histoire de l'humanité est certainement la roue hydraulique. Entraînant un moulin à céréales, ou, plus tardivement, un pilon, un soufflet de forge, une pompe ou une scie, elle a été associée aux activités humaines les plus essentielles et les plus fréquentes. Elle a soulagé l'homme et l'animal en tant que sources d'énergie, avant d'être secondée ou remplacée elle-même par des machines actionnées par le vent, puis la vapeur, l'électricité, le pétrole, l'atome ou, bien sûr, par sa descendante directe, la turbine hydraulique. Délaissée depuis une cinquantaine d'années dans les parties industrialisées du globe, elle reprend aujourd'hui de l'activité en maint endroit en tant que témoin du passé, d'attraction touristique ou même de source d'énergie sûre, bon marché et écologique.

Ayant été appelés à participer à la rénovation ou à la reconstruction de l'une ou l'autre de ces machines, nous avons été amenés à confronter le regard de l'ingénieur du XX^e siècle à celui de ses devanciers et il nous a paru intéressant de rapporter ici quelques constatations. Nous commencerons par indiquer les divers types de roues existants et rappellerons ensuite quelques faits marquants de leur histoire. Enfin, nous examinerons, à l'aide de passages tirés d'ouvrages anciens, certaines connaissances techniques ou scientifiques les concernant, connaissances que nous confronterons aux raisonnements actuels.

Les types de roues hydrauliques

On classe généralement les roues hydrauliques dans deux catégories: l'historien distingue roue horizontale et roue verticale, et l'ingénieur s'exprime plus volontiers en termes de machine à axe vertical et de machine à axe horizontal. La première catégorie (figures 1 et 2) présente l'avantage de pou-

voir être montée directement sur l'axe de la meule qu'elle entraîne. L'aubage exploite l'énergie cinétique de l'eau et peut prendre la forme de simples planches verticales ou de cuillers dérivant l'eau vers le haut ou vers le bas. L'eau est amenée à la roue par une goulotte, ou éventuellement une conduite fermée, présentant une forte inclinaison et ayant pour but de transformer l'énergie potentielle en énergie cinétique.

La seconde catégorie, celles des roues à axe horizontal, nécessite une paire d'engrenages avec renvoi d'angle pour entraîner une meule, engrenages qui permettent du même coup une augmentation de la vitesse de rotation. Par contre, les dispositifs possédant un arbre horizontal, comme l'arbre à cames des marteaux-pilons et des soufflets, ou le vilebrequin des scies et des pompes, peuvent être entraînés directement. Selon la manière dont l'eau est amenée à la roue, on distingue les roues à choc, les roues par-dessous, les roues par le côté et les roues par-dessus (fig. 3). Le premier type, la roue à choc (fig. 4), fonctionne selon le même principe que la roue à axe vertical: elle tire parti de l'énergie cinétique contenue dans un jet, qui l'attaque tangentiellement en un point variable de la périphérie. Le deuxième type, la roue par-dessous, dite aussi roue à aubes, est le plus souvent installé sur un cours d'eau, par suspension à un bâtiment ou montage sur un bateau; ce type utilise lui aussi l'énergie cinétique de l'eau. La roue par le côté est, quant à elle, plus complexe, dans la mesure où elle doit tourner dans un coursier, lequel a pour but de maintenir l'eau sur l'aubage et donc d'assurer une étanchéité aussi bonne que possible entre les pièces fixes et les pièces mobiles. Enfin, les roues par-dessus, parfois appelées roues à augets, sont alimentées par un canal sur-élevé à faible pente (fig. 5) et elles exploitent presque exclusivement l'énergie potentielle fournie par le poids de l'eau sur une hauteur de chute approximativement égale à leur diamètre.

En ce qui concerne la répartition géographique des divers types, il est intéressant de noter qu'on rencontre des formes très semblables dans toute la partie de l'hémisphère nord située entre le cercle polaire et le tropique du Cancer, soit de la Scandinavie au Pakistan, et du Maroc au Japon. Les moyens de communication étaient autrefois certes moins rapides

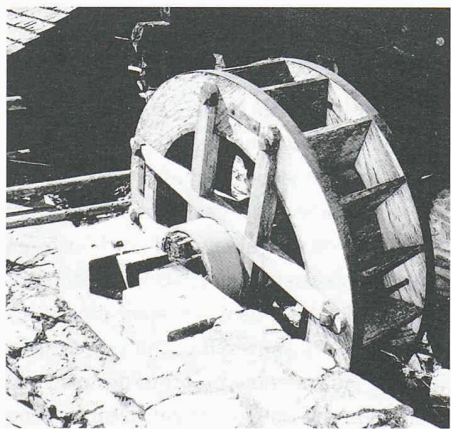
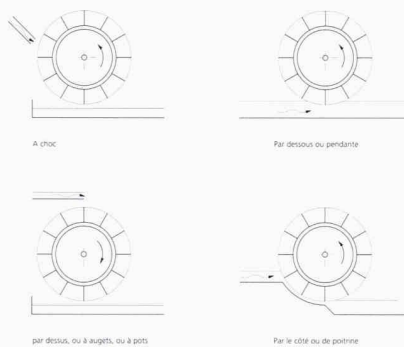
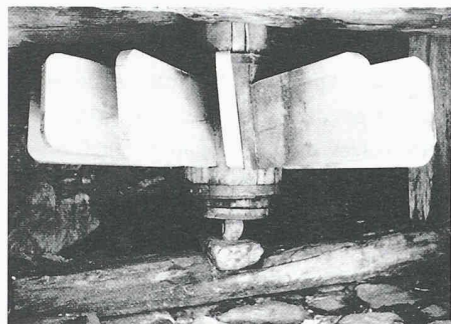
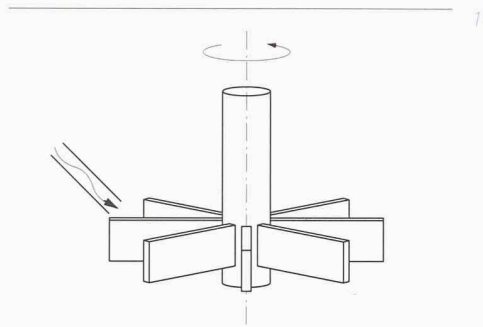


Fig. 1: Schéma d'une roue horizontale ou roue à axe vertical

Fig. 2: Roue horizontale dans la vallée des moulins à Saint-Luc (VS) (Photo de l'auteur)

Fig. 3: Classification des roues verticales ou roues à axe horizontal

Fig. 4: Roue verticale à choc dans la vallée des moulins à Saint-Luc (VS) (Photo de l'auteur)

Fig. 5: Scierie avec roue verticale par-dessus à Nax (VS)(Photo FDC)

qu'aujourd'hui, mais la pérennité des techniques leur ont assuré une large diffusion. Et si les données climatiques et géographiques, qui déterminent en particulier le débit et la chute, jouent un rôle quant au type de roue préféré, il semble bien que des facteurs de type culturel, habitudes ou savoir-faire, aient eu leur influence également. La roue horizontale, qui se contente de peu d'eau en tirant parti de la vitesse produite par une chute élevée, est plutôt répandue dans les pays secs et montagneux, alors que la roue verticale, qui nécessite normalement une grande quantité d'eau avec une chute faible ou même quasi nulle, se trouve plutôt en pays plat et humide. En Valais par exemple, les deux types de machines sont au total presque aussi fréquents l'un que l'autre, avec cependant une nette prédominance des roues horizontales à l'adret, sur la rive droite du Rhône, et des roues verticales à l'ubac, sur la rive gauche [1]¹, [2].

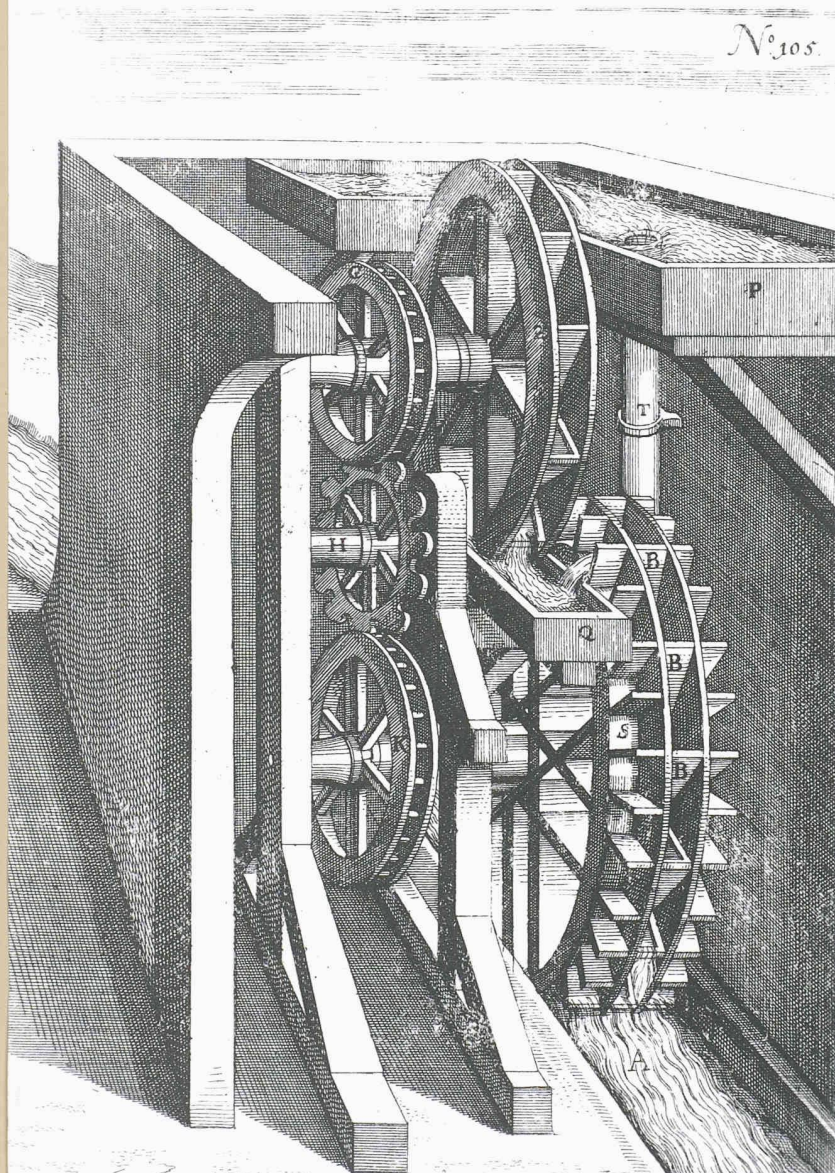
Au fil du temps

L'état actuel des fouilles archéologiques et l'étude des documents anciens ne permet pas de dater exactement l'invention de la roue hydraulique. Il semble qu'elle soit apparue à la fin du II^e siècle avant J.-C., simultanément en Chine et dans le bassin méditerranéen. Les premières mentions de moulins hydrauliques remontent au premier siècle avant J.-C. On ignore si la roue horizontale a précédé la roue verticale ou si ce fut l'inverse; en tout cas, ces machines étaient contemporaines d'autres du même genre, en particulier de celles servant à élever l'eau.

C'est lors de la «révolution industrielle du Moyen Age», aux XI^e et XII^e siècles, que l'utilisation de l'énergie hydraulique fait un bond considérable en Europe, augmentant fortement les ressources énergétiques à disposition des populations, et ce à un niveau qui restera par la suite pratiquement constant jusqu'à la révolution industrielle du XIX^e siècle. A partir de la Renaissance et jusqu'au XIX^e siècle, la roue hydraulique reste le moteur le plus fréquent de toutes les machines. En tant que tel, elle est présente dans nombre de textes et d'illustrations, de nature technique ou artistique (comme par exemple dans l'Encyclopédie [4]). Durant ces siècles, les techniques connues s'affinent et mûrissent, les unités de production gagnent en importance et les moulins à céréales prennent quelquefois une forme industrielle. Tant la géométrie que le rendement des roues s'améliorent et certains dispositifs, qui sont totalement immergés, préfigurent les turbines.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Fig. 6 et 7: Systèmes hydrauliques complexes à roues verticales, décrits par Andreas Bockler dans son ouvrage «Theatrum Machinarum Novum, Exhibens Opera Molaria et Aquatica», Nuremberg, 1662, 2^{ème} édition (Photos Alain Herzog, EPFL)



Le pas décisif du point de vue théorique et scientifique est franchi en plein Siècle des lumières, lorsqu'en 1754, Leonhard Euler publie sa «Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau» et fait appel aux dernières découvertes en mathématique et en mécanique. Alors commence l'histoire des turbines, mais cela ne marque pas la fin de la roue hydraulique qui continue à actionner moulins, pressoirs ou scies jusqu'à une époque toute récente, surtout dans les régions écartées: ainsi, en 1956, l'Administration fédérale des blés subventionne la reconstruction d'une roue horizontale de type archaïque à Taesch près de Zermatt [1].

Les manuels du meunier

Il existe de nombreux ouvrages fournissant des indications sur la façon de construire une roue à eau. Certains sont de nature scientifique: ils se concentrent sur la roue elle-même et décrivent, par des méthodes théoriques ou expérimentales,

ses caractéristiques et les principes de son fonctionnement. D'autres travaux sont de nature empirique et tentent de rassembler les connaissances permettant au meunier de concevoir toutes les installations nécessaires à l'obtention de la farine: de la roue aux meules, du baille-blé au blutoir. C'est sur ce type de manuel que nous porterons notre attention ici, en décrivant comment leur style évolue au cours du temps et quelle sorte de renseignements on peut en tirer sur les roues hydrauliques, sur leur géométrie et leur vitesse de rotation en particulier.

Tout d'abord, insistons sur le fait que les moulins ont été construits et mis au point pendant des siècles par des artisans et non par des scientifiques, les connaissances théoriques fondamentales nécessaires n'ayant été acquises qu'au milieu du XVIII^e siècle, avec les publications de Johann et Daniel Bernoulli et de Leonhard Euler. Béguellet nous dit à ce propos en 1775 ([5] p. 27): «Il arrive souvent que la théorie appuyée d'une démonstration apparente, se trouve en défaut contre l'expérience. ... C'est ainsi que la pratique l'emporte toujours sur la théorie; mais cette dernière jointe à la pratique, est la base de tous les arts. Ce n'est que dans des Ecoles fondées par le Gouvernement, qu'on pourrait former des Elèves également instruits dans la théorie et la pratique.» A son époque, la façon de construire les machines fait donc déjà appel à des connaissances théoriques, même si celles-ci ne semblent pas mériter encore une pleine confiance!

Du fait que des artisans expérimentés - charpentiers, menuisiers, charrons et forgerons notamment - se trouvent habituellement chargés de la réalisation d'un moulin, les manuels ne décrivent pas les détails constructifs que leurs arts maîtrisent. Comme le dit Sturm dans son avant-propos [6]: «Mais pour ce qui concerne le travail connu des artisans, comme enfoncer des pieux, rendre étanches des planches dans l'eau par l'ajustage et le goudron et autres choses semblables, je n'ai pas voulu le mentionner, parce que cela est partout connu de tous les artisans dont on a besoin pour ce type de construction et n'est pas un secret.»²

Les faiblesses communes à beaucoup d'ouvrages sont parfaitement décrites par Sturm dans son préambule [6]: «... Car premièrement les vues dans ces livres sont perspectives et non selon les règles géométriques, mais seulement à vue d'œil et à main levée, si bien qu'on ne peut en tirer ni dimension ni subdivision. La deuxième faute est qu'il n'y a que peu de choses réalisables, et plusieurs ont des équipements assemblés de bric et de broc et disparates, qui ne conviennent pas

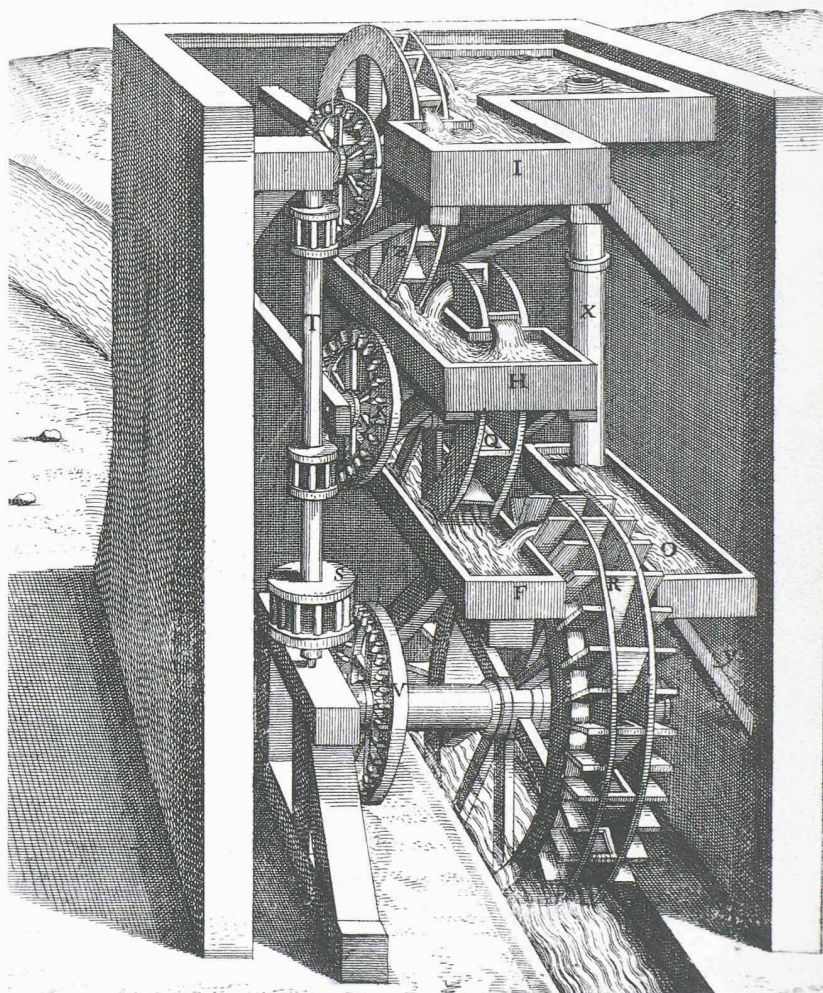
² Ce passage tiré de l'ouvrage de Sturm - ainsi que les suivants et ceux pris chez Weinholz -, ont été traduits de l'allemand par Michel Dubas.

à la pratique. Troisièmement, lorsqu'il s'y trouve de bonnes inventions, les auteurs les ont intentionnellement déformées, comme s'ils voulaient faire comprendre par là aux connaisseurs qu'ils avaient bien connu les secrets, mais qu'ils les cachent avec application pour que ceux qui ne les connaissent pas ne puissent les imiter. Quatrièmement, ils n'ont pas donné d'explication distincte, pas de tour de main, ni causes, ni calculs, ce qui pourtant importe.»

Avant d'examiner de manière plus détaillée le contenu de l'un ou l'autre ouvrage, mentionnons encore le soin apporté aux illustrations, sous forme de gravures sur cuivre annexées à la fin du texte, et qui sont en général nombreuses malgré le coût élevé qu'elles représentent à ces époques.

Le livre de Leonhard Christoph Sturm [6] est paru pour la première fois en 1718 et n'a pas connu moins de six rééditions jusqu'en 1819. Il consiste en cinquante planches gravées accompagnées de commentaires et d'explications. Les dessins sont à l'échelle, avec à chaque fois, si nécessaire, une vue en plan et une vue en élévation; c'est à leur qualité et à leur précision qu'est dû le succès de l'ouvrage. Ces planches présentent tantôt des constructions courantes au XVIII^e siècle, tantôt des inventions ingénieuses de l'auteur, en particulier sur les systèmes permettant de régler la hauteur des roues par-dessous pour s'adapter au niveau variable du cours d'eau, ou sur l'entraînement et la disposition de plusieurs meules. L'auteur nous présente un calcul compliqué de la position des dents sur le pourtour des engrenages et du rapport de réduction obtenu (pl. XVI), mais ne dit rien du diamètre des roues ou des meules, ni de leur vitesse de rotation. Certains détails sont étonnants: les planches XIX B et C montrent des engrenages démontables pour pouvoir arrêter certaines des meules, et des roulements à galets!

Si l'on consulte l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (dont les volumes de texte sont publiés dans la première édition de 1751 à 1775, [3]) à l'article «Moulins», on lit: «La meule tournante a assez de vitesse si elle fait 50 ou 60 tours par minute, une plus grande vitesse échauffe trop la farine. Les meules ordinaires ont depuis 5 jusqu'à 7 piés (sic!) de diamètre», c'est-à-dire, un pied français valant 0,325 m, de 1,6 à 2,3 m (tome 22, p. 391). Pour les roues par-dessous, on apprend plus loin (p. 399) le nombre de dents des deux roues dentées: «La grande roue... porte aussi un rouet, dont les alluchons, au nombre de soixante, engrènent dans les fuseaux de la grande lanterne, qui sont au nombre de seize.» Avec un rapport de 16/60 (0,27), la roue à eau fait donc entre 13 et 16 tours à la minute. Sur une roue par le côté en revanche (p.400), «ce même rouet qui a 48 aluchons (ici avec un seul / !), mène une lanterne de neuf ou dix fuseaux», ce



qui donne de 9,5 à 12,5 tours par minute pour la roue à eau. Quant à la roue par-dessous, réservée aux cas où «l'eau, destinée à faire tourner un moulin, n'est pas abondante, et [où] la chute a beaucoup de hauteur» (p.400), il nous est simplement dit qu'elle fonctionne comme la précédente.

En 1832, D. W. Weinholz [7] est plus précis et plus complet dans son traité; il énumère plusieurs façons de faire, y compris celles d'Angleterre, de France ou de Tchèque. Il donne des indications exhaustives sur les dimensions des roues et leur géométrie. Pour les roues par-dessous, on apprend par exemple que le canal d'amenée a d'habitude une pente de 1 pouce par 100 pieds de longueur, soit, un pied ayant 12 pouces, de 0,08% (p. 430). De fait, ce sont là des données favorables: outre que d'assurer une arrivée lente de l'eau sur la roue, on évite ainsi des pertes de hauteur de chute, de même que la réduction de la vitesse d'écoulement minimise les pertes de charge. En ce qui concerne les augets, les problèmes de perte d'eau et d'évacuation de l'air sont pris

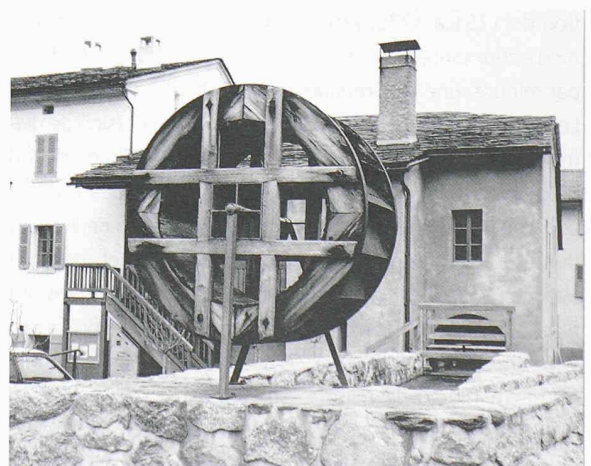
en compte: le degré de remplissage des augets ne devrait pas dépasser $1/3$ environ (p. 242) et il vaut mieux agrandir les augets en largeur que leur donner trop de profondeur (p. 244). En outre, «on donne à la roue environ la moitié d'aubes en plus que le diamètre extérieur compte de pieds rhénans» (p. 236); pour un diamètre de 3 m par exemple, on aurait donc environ (avec 1 pied $\approx 0,33$ m) $9 + 5 = 14$ aubes, ce qui paraît relativement peu. Les aubes sont faites normalement de deux planches dont les inclinaisons peuvent varier, mais l'exécution en fer est recommandée (p. 248).

Le plus souvent, le diamètre des meules tournantes est compris entre 3 et 4 pieds en Allemagne et entre 5 et 6 pieds en France (p. 355). En conséquence de quoi, les vitesses de rotation ne sont pas les mêmes: de 130 à 140, voire 200 t/min en Allemagne contre 60 t/min en France (p. 362). Le rapport de réduction de la paire ou des deux paires d'engrenages est aussi précisé: «Où l'on a peu d'eau, on compte habituellement, pour une machine par-dessus, $1\ 1/4$ tour [de la meule] par pied de hauteur de la roue» (p.432). Ainsi, si la meule tourne à 130 t/min et qu'on a une roue de 3 m = 10 pieds, le rapport de réduction est de 10,25; la roue à eau a une vitesse de rotation de 12,7 t/min et une vitesse périphérique de 2 m/s. Mais, ajoute l'auteur, ce genre de calcul n'est pas toujours exact car les constructeurs donnent toujours à leurs grandes roues dentées un nombre de dents qui est un multiple de quatre, tandis que leurs petites roues ont le plus souvent six dents. Là encore, on constate que le nombre de dents des engrenages a quelque chose de sacré et d'intangible!

Bien que publié presque en même temps que celui de Weinholz, le manuel de Benoît [8] -dont l'auteur est présenté sur la page de titre comme «Ingénieur pour les Usines, Manufactures, Machines, etc.» - est notablement plus moderne et plus scientifique, ce qui reflète l'avance technologique de la France et de l'Angleterre sur l'Allemagne à ce moment-là. Ainsi, le critère pour la vitesse de rotation des meules est la vitesse aux deux tiers du rayon de la meule courante, qui doit être de 4 m/s. En exprimant sur cette base la vitesse de rotation (n) de la meule en tours par minute en fonction de son diamètre extérieur (d), on obtient $\pi d n / 60 \times 2/3 = 4$ m/s, $n = 114,57 / d$, soit la règle suivante énoncée par Benoît (p. 413): «Mesurez le diamètre de la meule en mètres, et divisez le nombre invariable 114,57 par le nombre qu'aura fourni la mesure effective; le quotient de cette division exprimera le nombre de tours que la meule considérée devra faire durant chaque minute.» Selon cette règle, les meules de l'Encyclopédie, avec 6 pieds = 1,9 m de diamètre, devraient tourner à 59 tours par minute, ce qui se situe bien à l'intérieur des limites recommandées.

L'auteur nous indique aussi ce qu'on cherchait en vain dans les ouvrages antérieurs: sur la base d'expérimentations menées par plusieurs chercheurs (qu'il cite d'ailleurs pour la plupart), il connaît le poids idéal des meules (p. 412), la force (qu'il appelle effort) tangentielle qu'il faut exercer pour les faire tourner (p. 417) et, par conséquent, la puissance (qu'il appelle force) nécessaire (p. 418). Il peut aussi indiquer la quantité de blé moulue par seconde, cela pour la mouture dite à la grosse (p. 418) comme pour la mouture économique (p. 419), laquelle exige plus d'énergie.

La puissance mécanique consommée par les meules est mise en relation avec la puissance hydraulique dont doivent disposer les roues à eau, les rendements de ces dernières étant connus pour tous les types. Benoît nous indique entre autres (p. 439) que, «de toutes les roues hydrauliques, celles à augets, recevant l'eau à leur point culminant sont les plus avantageuses, puisqu'elles rendent des $3/4$ aux $4/5$ de la force du cours d'eau qui les met en mouvement. Ces résultats sont confirmés par tant d'expériences qu'on ne doit jamais balancer à employer les roues en dessus, lorsque la chute n'est pas moindre que 2 mètres. L'expérience apprend que la vitesse convenable à ces sortes de roues est généralement de 1 mètre par seconde à la circonférence extérieure. En adoptant ce résultat, il faudra, pour suivre les indications de la théorie, faire arriver l'eau sur la roue sans choc et avec une vitesse double, c'est-à-dire de 3 mètres par seconde.» Même si certaines dénominations ne sont plus les nôtres, même si nous utiliserions un langage plus mathématique, même si nous souhaiterions des déductions un peu plus rigoureuses, les raisonnements et les concepts sont ceux dont nous nous servons au XX^e siècle. Relevons aussi que les rendements annoncés sont élevés: dans cette classe de puissance (de quelques kW seulement), on ne fait guère mieux



à l'heure actuelle, alors que les grosses turbines - telles les machines Pelton qui viennent d'être mises en service à la centrale de Bieudron - atteignent 423 MW et dépassent 90% de rendement maximal.

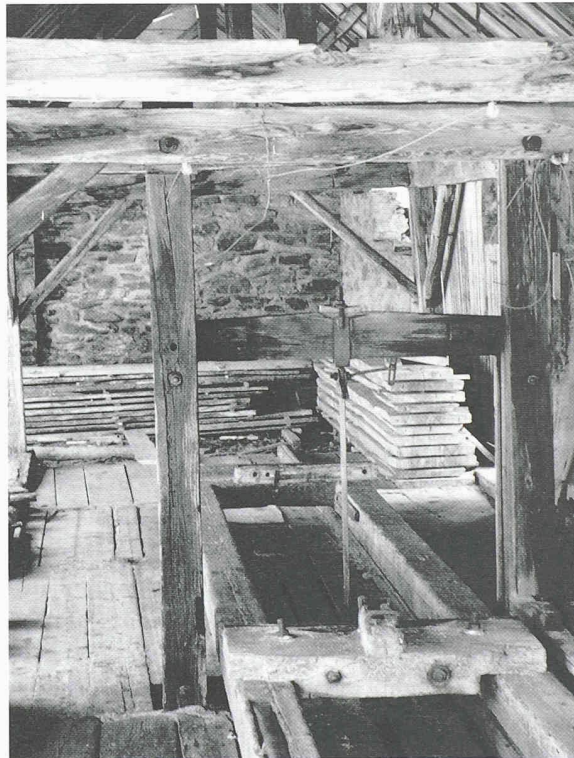
Conclusion

Depuis son apparition jusqu'à la révolution industrielle, la roue à eau demeure étroitement liée au moulin à céréales, mais la science de l'ingénieur, ainsi que l'art et les matériaux du constructeur, ont été profondément modifiés. En 1910, Chrysochoïdès par exemple ne parlera dans son manuel [9] que de la mouture et des appareils nécessaires à l'obtention de la farine, mais plus des roues à eau. Outre les meules, il mentionne les cylindres et les broyeurs métalliques pour la mouture du blé. La roue à eau, comme le cheval d'ailleurs, est déjà remplacée par la machine à vapeur et le moteur électrique. Les meules sont elles aussi en passe d'être supplantées par d'autres systèmes, et le pain lui-même, qui assurait depuis des siècles l'essentiel de la nourriture des Européens, va perdre sa prédominance. Ainsi disparaissent des façons de faire et de vivre qui ont traversé quelque deux mille ans sans subir de modification fondamentale...

Bibliographie

- [1] PELET, P.-L.: «Turbit et turbine. Les roues hydrauliques horizontales du Valais», Vallesia, vol. 43, pp. 125-164, Sion, 1988
- [2] PELET, P.-L.: «Des Rois Mages à la dynamo. Les roues hydrauliques verticales en Valais», Vallesia, vol. 46, pp. 245-276, Sion, 1991
- [3] DIDEROT, D., D'ALEMBERT, J. LE ROND: «Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, édition exactement conforme à celle de Pellet», Sociétés typographiques, Berne et Lausanne, 1778-1781
- [4] DIDEROT, D., D'ALEMBERT, J. LE ROND: «Recueil de planches sur les sciences, les arts libéraux, et les arts mécaniques, avec leur explication», annexe à l'Encyclopédie, 1762-1772, réimpression: H. Veyrier, Paris, 1965
- [5] BÉGUILLÉ, M.: «Manuel du meunier et du charpentier de moulins ou abrégé classique de la mouture par économie», Paris, 1775
- [6] STURM, L.-C.: «Vollständige Mühlen-Baukunst», 5^e éd., M. Rieger, Augsburg, A.G. Schneider, Nuremberg, 1815, réimpression: Th. Schäfer, Hannover, 1991
- [7] WEINHÖLZ, D. W.: «Vollständiges, theoretisches Handbuch der Mühlenbaukunst», vol. 2, in «Neuer Schauplatz der Künste und Handwerke», vol. 58, B. F. Voigt, Ilmenau, 1832
- [8] BENOÎT, P.-M.-N., «Manuel complet du boulanger, du négociant en grains, du meunier et du constructeur de moulins», 3^e éd., Encyclopédie Roret, Paris, 1836
- [9] CHRYSOCHOÏDÈS, N.: «Nouveau manuel complet du meunier, du négociant en grains et du constructeur de moulins», Encyclopédie Roret, t. 1, Paris, 1910

La rédaction remercie chaleureusement M. Meletis Michalakis, collaborateur scientifique à la bibliothèque centrale de l'EPFL, pour sa précieuse contribution à la recherche iconographique.



9



10