

Renkin Sualem (Rennequin Samuel)

(Jemeppe-sur-Meuse, 29 janvier 1645 - Marly, 29 juillet 1708)

Maître-charpentier liégeois, concepteur de la machine de Marly destinée à alimenter en eaux les jardins, étangs et fontaines des châteaux de Marly et de Versailles, il réalisa le rêve fou du Roi Soleil : « détourner » la Seine !

Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège

Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt. AGO (Astrophysique)

y.renotte@uliege.be – www.hololab.ulg.ac.be – www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13

Trois parties

- **Le contexte historique** : le Roi Soleil veut affirmer sa magnificence et sa puissance à l'Europe en aménageant Versailles, notamment les jardins et en multipliant les fontaines et jets d'eau.
- **L'Homme et la Machine** : le charpentier liégeois qui réalise le rêve fou de Louis XIV en amenant les eaux de la Seine à Versailles.
- **L'aspect technico-scientifique** : dans quelle mesure les données disponibles relatives à l'évolution du fonctionnement de la Machine sont-elles plausibles ?

Table des matières

- [Avant-propos](#) p.1
- **Le contexte historique** : le Roi Soleil veut affirmer sa magnificence et sa puissance à l'Europe en aménageant Versailles, notamment les jardins et en multipliant les fontaines et jets d'eau.
 - [La réalisation](#) p.3
- **L'Homme et la Machine** : le charpentier liégeois qui réalise le rêve fou de Louis XIV en amenant les eaux de la Seine à Versailles.
 - [L'homme](#)
 - [Modave](#) p.7
 - [Marly](#) p.8
 - [La Machine](#)
 - [Description historique](#) p.9
- [Références](#) p.15
- **L'aspect technico-scientifique** : dans quelle mesure les données disponibles relatives à l'évolution du fonctionnement de la Machine sont-elles plausibles ?
 - [Comment ça marche ?](#)
 - [Pompes et roues hydrauliques](#) p.17
 - [Quelques considérations préliminaires](#) p.18
 - [Quelques réflexions à propos du système hydraulique](#) p.19
 - [Quelques réflexions à propos de la Machine et de son fonctionnement](#) p.20
 - [Évolution temporelle de quelques paramètres](#)
 - [La puissance \$P\(t\)\$](#) p.22
 - [Moment d'inertie et masse des roues](#) p.22
 - [Évolution temporelle de la vitesse de rotation des roues \$\omega\(t\)\$](#) p.23
 - [Évolution temporelle des pertes \$f_r\(t\)\$](#) p.24
 - [Pertes de charge](#)
 - [Aspect spatial](#) p.25
 - [Aspect temporel](#) p.27
 - [Conclusion](#) p.28
 - [Références](#) p.28

Avant-propos

La présente note s'inscrit dans une série * débutée en décembre 2019 après la mise à l'honneur par le moteur de recherche international Google d'un scientifique quasiment inconnu à Liège alors qu'il y a étudié et soutenu une thèse doctorale en 1829, un peu avant l'indépendance de la Belgique. Opto-physiologiste réputé, il est pourtant honoré à Gand et à Bruxelles.

Intéressé, et sans doute quelque peu « intrigué » par le personnage depuis plusieurs années, surtout par le manque d'attention et de reconnaissance liégeois, j'ai répondu avec plaisir aux demandes d'informations le concernant. Dans la foulée, entraîné par un collègue et ancien étudiant, j'ai étendu mes investigations à quelques autres « personnalités scientifiques » régionales ayant connu des destins fort différents. Certaines ont été très largement, et à juste titre, quasiment « glorifiées » alors que d'autres, contemporaines ayant tout aussi utilement servi la société, sont nettement moins connues, voire complètement oubliées. Je pense par exemple au duo d'électriciens *Zénobe Gramme*, archi-connu, et *Michel Gloesener*, nettement moins célèbre . . . même si son nom a été attribué à un quai de la Meuse à Liège. D'autres duos ont été moins « chanceux », tel *René de Sluse* et *Francis Line*, alias *Linus de Liège*. Le premier a laissé son nom à une rue aujourd'hui coupée en deux par l'autoroute urbaine A602, le second est purement et simplement passé aux « *oubliettes de l'histoire* » bien qu'il soit probablement un des « *pères fondateurs* » de l'esprit scientifique à la base de l'énorme élan technologique qui s'est développé dans la région liégeoise à partir de la Renaissance.

Je suis de ceux qui estiment qu'il est utile, et peut-être même nécessaire, d'inscrire l'étude des sciences et des techniques dans le contexte historique où elles sont apparues et se sont développées. Je crois que les situer dans le temps aide à les comprendre plus aisément et à en appréhender plus facilement la complexité. Personnellement, j'ai ressenti très tôt que cette « dimension temporelle » manquait, notamment à ma formation. J'aurais aimé que l'on me parle de nos « *glorieux anciens* » sans pour autant « empiéter » sur le temps, souvent trop restreint j'en conviens, dévolu à l'enseignement des sciences et des techniques. Habilement incluses dans les études de ces matières, de telles considérations aideraient probablement à « *mieux comprendre où l'on va, sachant d'où l'on vient* » !

J'ai volontairement consacré le dernier opus de cette « *mini-saga* » à un personnage assez bien connu, *Renkin Sualem* (1645-1708), le charpentier liégeois, prétendument « presque illettré », qui a réalisé le rêve fou du *Roi Soleil* : amener les eaux de la Seine à Versailles pour alimenter les multiples jets d'eau, fontaines et étangs qui agrémentent l'immense jardin imaginé par le jardinier royal, le « grand » *André Le Nôtre* (1635-1700). Une littérature abondante a été consacrée au concepteur – réalisateur et surtout à « sa célèbre *Machine de Marly* », dès sa réalisation. Pour une fois, **mon propos est moins de « chanter la grandeur de l'œuvre », au sens propre comme au figuré, que d'essayer de démêler le vraie de la « propagande » savamment orchestrée par Louis XIV** (1638-1715) et son entourage pour

satisfaire son besoin viscéral d'affirmer et d'afficher sa magnificence, Versailles et la Machine de Marly étant évidemment de splendides vitrines.

Je tente donc de proposer une approche permettant à chacun de se faire une idée du degré de crédibilité et de réalisme technico-scientifiques des descriptifs et données, rares et souvent peu précis, disponibles dans les nombreux récits illustrant la Machine et son fonctionnement.

- *) Yvon Renotte et Stéphane Dorbolo, *Joseph Antoine Ferdinand Plateau*, Sciences et Culture, Bull. n°482 (novembre – décembre 2019), pp.174–177 + dos de couverture, <http://hdl.handle.net/2268/255984>
- Yvon Renotte & Stéphane Dorbolo, *Etienne-Gaspard Robertson, un savant liégeois oublié dans les couloirs du temps !*, Sciences et Culture, Bull. n°483 (janvier – février 2020), pp.8–15 + dos de couverture, <http://hdl.handle.net/2268/255983>
- Yvon Renotte, *Nul n'est prophète en son pays ! Joseph Antoine Ferdinand Plateau*, Contact, Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège, n°2020/2 (mars – avril 2020), p.27, <http://hdl.handle.net/2268/258751>
- Yvon Renotte, « *One more ...* » : *François-Laurent Villette*, Sciences et Culture, Bull. n°485 (mai – juin 2020), pp.99–108 + dos de couverture, <http://hdl.handle.net/2268/258698>
- Yvon Renotte, *Francis Line, connu sous le patronyme Linus de Liège*, Sciences et Culture, Bull. n°486 (septembre – octobre 2020), pp.120–132, <http://hdl.handle.net/2268/258697>
- Yvon Renotte, *Longdoz : le coin des anciens opticiens liégeois*, Contact, Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège, n°2020/4 (novembre – décembre 2020), pp.39–43, <http://hdl.handle.net/2268/258696>
- Yvon Renotte, *Fragnée : le coin des anciens électriciens liégeois*, Contact, Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège, n° 2021/2-3 (mai – juin 2021), pp.53–57, <http://hdl.handle.net/2268/259639>
- Yvon Renotte, *François de Sluze : dialogues avec Christiaan Huygens*, Contact, Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège, n°2021/2-3 (mai – juin 2021), pp.58–68, <http://hdl.handle.net/2268/259640>
- Yvon Renotte, *Un Liégeois précurseur et spécialiste des cadrans solaires, ... fort oublié ... Francis Line, connu sous le patronyme « Linus de Liège »*, Le Ciel, Bulletin de la Société Astronomique de Liège, Vol. 83, juin 2021, pp.332–345, <http://hdl.handle.net/2268/260564>
- Yvon Renotte, « *Nul n'est prophète en son pays . . .* », présentation à l'U3A (Université du 3^e âge de Liège) – 15 mars 2022, ppp : 39 pages, ppt : 75 slides, <https://hdl.handle.net/2268/260775>
- Yvon Renotte, *Renkin Sualem, un Liégeois au service de Louis XIV*, Science et Culture, Bull. n°487 (avril 2022), pp.32–43, <https://hdl.handle.net/2268/288427>

La réalisation

Lambert Lombard est un cas particulier : *le concepteur est moins connu que sa réalisation*. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation surprenante, notamment le fait que l'objet de ses travaux ait bénéficié à un personnage d'envergure exceptionnelle, le Roi Soleil, du moins à son prestige par l'apport au besoin de magnificence exacerbée du souverain qui voulait surpasser toutes celles et ceux qui l'entouraient ou le côtoyaient. Et ce fut le cas puisque l'inventeur imagina et fit réaliser un dispositif hydraulique gigantesque permettant de prélever de l'eau de la Seine à Bougival pour l'amener à Marly, dans un réservoir qui domine Versailles de 33 mètres permettant ainsi d'alimenter les nombreux bassins et fontaines disséminés dans le parc, pour le plus grand plaisir et le divertissement de Louis XIV et de la foule de ses courtisans ¹. *Nul doute que le gigantisme de quatorze roues de douze mètres de diamètre, mues par une chute de la Seine créée artificiellement, et activant trois cents pompes avait de quoi impressionner les yeux et... les oreilles.*

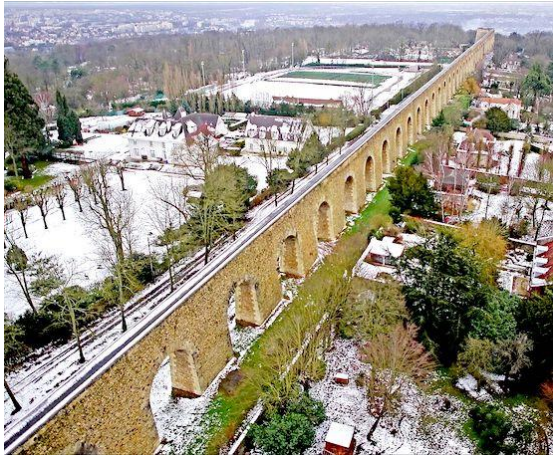


Le Château de Versailles : Les Grandes Eaux (aujourd'hui) – à gauche ; 1668 – Pierre Patel (1604-76) – à droite ²

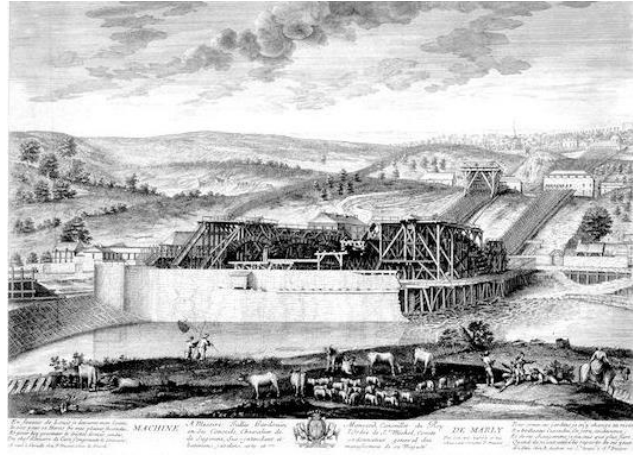
Les jardins de Versailles étant agrémentés d'un riche dispositif de fontaines dès les années 1660, plusieurs systèmes d'adduction d'eau ont été employés avant la construction de la machine de Marly, comme le pompage des étangs situés aux alentours de Versailles. Mais le Roi et les architectes de Versailles se rendirent rapidement compte qu'il allait falloir acheminer une énorme quantité d'eau pour alimenter ces ornements alors que les étangs alentours sont déjà surexploités et souvent à sec en été. ***Une idée folle naît alors dans l'esprit du souverain : il faut faire venir l'eau de la Seine.***

En 1678, on envisagea donc de pomper les eaux de la Seine en contrebas de la colline de Marly. Le travail fut titanesque et la réalisation exceptionnelle pour l'époque.

Le chantier pharaonique employa plus de 1800 ouvriers, dont beaucoup venus de Wallonie, pendant trois ans (1681-84) pour construire l'énorme machinerie capable d'amener l'eau à quelques kilomètres, mais surtout à plus de 160 mètres au-dessus du niveau naturel du fleuve. La machinerie gigantesque est la plus grande réalisée dans le domaine à l'époque, elle sera même surnommée la « huitième merveille du monde », commandée par le Roi Soleil afin de « faire chanter les innombrables fontaines et jeux d'eaux des jardins de Versailles ».



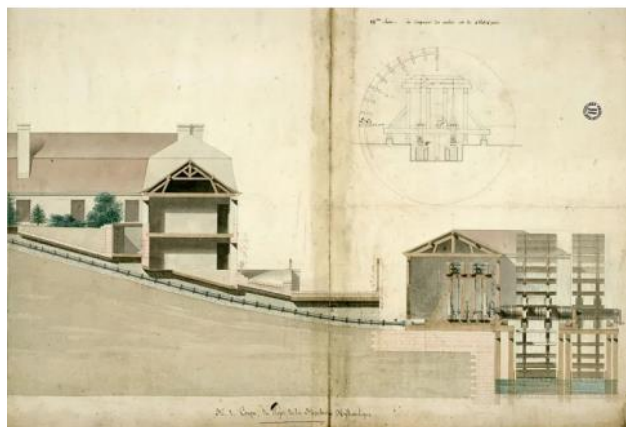
L'aqueduc de Louveciennes – 36 arches, 643 m de long, 2 à 4,4 m de large, 10 à 20 m de hauteur



Gravure illustrant le fonctionnement de la Machine fin du XVII^e siècle



Vue de la machine de Marly, de l'aqueduc et du château de Louveciennes - Pierre-Denis Martin (1663-1742)
© Château de Versailles (Dist. RMN-Grand-Palais de France) / Gérard Blot - photographe



La deuxième machine entrée en fonctionnement dès 1811

Si elle fait la fierté du monarque, la machine de Marly cause bien des tourments au Surintendant des finances *Colbert*^a, car sa construction a coûté plus de 3 millions de livres à un Etat déjà bien endetté par les campagnes militaires et les festivités royales.

Contrairement à ce qu'on croit, elle n'est pas située à Marly, où l'on construit seulement un réservoir, mais entre Louveciennes et Bougival, à quelques kilomètres de Versailles (± 7 km à vol d'oiseau). On utilise une foule de matériaux, du bois, du fer, du plomb, de la fonte, par milliers de tonnes. La première étape de la construction est la plus risquée, détourner la Seine au niveau de Bezons, dans les Yvelines à l'aide de digues. Suit l'édification de galeries, de tuyaux, d'aqueducs, et de roues.

Le chantier, commencé en 1681 s'acheva le 16 juin 1684. La machine sera inaugurée par le Roi Louis XIV³. Hélas, non seulement la Machine est bruyante et coûte cher, mais, constituée à 90 % de bois, elle se détériore assez rapidement. Le matériau est naturellement sujet à l'usure, qui plus est au contact de l'eau, une des causes de sa détérioration progressive et de sa perte d'efficacité. La machine survécut néanmoins à son auteur, décédé le 29 juillet 1708, âgé de 64 ans. Elle fonctionna 133 ans quasiment sans interruption avant d'être remplacée par une machine à vapeur en 1817.

Dès sa mise en route, une mauvaise synchronisation entraînant frottements et usure des pièces, le dispositif n'a pas permis de pomper le volume d'eau espéré de 6 000 m³ par jour. Pourtant, la Machine fonctionnait sans discontinuer, sauf quand la Seine était en crue, gelée ou que son niveau était trop bas. Le volume étant insuffisant pour les besoins des jeux d'eau de Versailles, *Vauban*^b commença dès 1685 la construction du canal de l'Eure – autre projet pharaonique – néanmoins abandonné en 1688.

Vers 1800 toute idée de réparation est abandonnée, on cesse de l'entretenir ce qui accélère sa dégradation : son rendement continue de baisser, passant de 640 m³ par jour en 1798 à 240 m³ par en 1803. Sous la Révolution, on envisagea même de la détruire. Elle est finalement démontée en 1817.

Brunet, entrepreneur en charpente, propose un nouveau dispositif afin d'élever les eaux d'un seul jet grâce à des roues hydrauliques. L'idée est prometteuse mais n'est pas retenue. On lui préfère le projet proposé par *Constantin Périer*^c : les eaux seraient remontées au moyen de deux machines à vapeur.

Une machine provisoire intervient avant d'utiliser, dès 1827, une pompe à vapeur construite par l'architecte *François-Charles Cécile*^d et l'ingénieur *Louis Martin* mais consommant bien trop de charbon, les coûts d'exploitation sont toujours prohibitifs et on change à nouveau la machine en 1859, sous *Napoléon III*^e. Cette troisième machine hydraulique, plus performante, est conçue par *Xavier-Edouard Dufrayer*^f, directeur du Service des Eaux). Elle comportait six roues de 12 m de diamètre et 4,5 m de large, pesant 120 tonnes et entraînant quatre pompes. Chaque roue était capable d'assurer un débit de 3 500 m³ par jour, soit 21 000 m³ pour l'ensemble de l'installation. Pour faire face aux besoins croissants en eau, on modernise la machine de Dufrayer jusqu'en 1963, mais on la démonte entièrement en 1968 pour la remplacer par des groupes d'électropompes beaucoup plus puissantes et rentables.



Rennequin Sualem
(1645-1708)



Jacques-Constantin Périer
(1742-1818)



François-Charles Cécile
(1766-1840)



Xavier-Edouard Dufrayer
(1811-79)

En résumé, trois machines hydrauliques et une à vapeur se sont succédées sur le site de Bougival :

- la machine complexe et principalement en bois de *Rennequin Sualem* (1684-1817),
- celle jugée provisoire de *Périer* (1817-1826),
- la machine à vapeur très coûteuse en combustible de *Cécile* et *Martin* (1827-1859)

- et enfin, la machine hydraulique de *Dufrayer* (1859-1969), démontée lors de la construction du barrage de Bougival. Les deux dernières fonctionnèrent simultanément entre 1858 et 1859.



La Machine de Dufrayer



Le pavillon Charles X aujourd'hui

- Jean-Baptiste Colbert* (1619-83) est l'un des principaux ministres de Louis XIV, à partir de 1665, contrôleur général des finances, secrétaire d'État de la Maison du Roi et secrétaire d'État de la Marine.
- Vauban (Sébastien Le Prestre de Vauban, 1633-1707)*, ingénieur, architecte militaire, urbaniste, hydraulicien et essayiste français nommé maréchal de France par Louis XIV. Il préfigure par nombre de ses écrits, les philosophes du siècle des Lumières. Expert dans l'art d'organiser l'attaque ou la défense lors du siège d'une ville, d'un lieu ou d'une place forte, il donne au royaume de France une « ceinture de fer » qui protège le pays par une centaine de citadelles, places fortes inexpugnables toutes conçues selon un principe identique. Il dote la France d'un glacis qui la rend inviolée durant tout le règne de Louis XIV (à l'exception de la citadelle de Lille prise une fois) jusqu'à la fin du 18^e siècle, période où les forteresses sont rendues obsolètes par les progrès de l'artillerie.
- Jacques-Constantin Périer* (1742-1818), ingénieur français autodidacte et homme d'affaires qui a fondé avec son frère la Compagnie des eaux de Paris pour alimenter en eau la ville de Paris par une pompe à feu comme c'était le cas à Londres. Il est connu pour avoir introduit en France la machine à vapeur de Watt en 1779 et avoir construit la première machine à double effet en 1789.
- François-Charles Cécile* (1766-1840), ingénieur mécanicien, il est architecte du Roi et directeur de la « Machine de Bougival ». Il fit partie de la commission Fourier pour l'exploration de la Haute-Égypte : le 5 janvier 1799, avec l'ingénieur Jomard, il mesure, marche par marche, la hauteur de la grande pyramide.
- Charles Louis Napoléon Bonaparte* (1808-73), est l'unique président de la Deuxième République Française (1848-52), le premier chef d'État français élu au suffrage universel masculin, le 10 décembre 1848 le premier président de la République française, et après la proclamation de l'Empire le 2 décembre 1852, le dernier monarque du pays sous le nom de *Napoléon III*, empereur des Français.
- Xavier-Edouard Dufrayer* (1811-79), ingénieur, il marqua les Yvelines de ses travaux sur le réseau de rivières, alimentant la plaine de Versailles grâce à ses machines hydrauliques. Après avoir occupé plusieurs postes, notamment à la compagnie des chemins de fer Paris – Versailles Rive Gauche, il entre au Service des eaux de Versailles en tant que sous-inspecteur de la machine de Marly. Il va monter un à un les échelons jusqu'au dernier et imposer ses idées : son chantier principal est le remplacement, en 1858, de la machine à vapeur de Marly par une puissante machine hydraulique sur la Seine alimentant en eau la population et les fontaines de Versailles, Saint-Cloud et Meudon. Son succès lui vaut la reconnaissance de l'empereur Napoléon III et les honneurs de *l'exposition universelle de 1867*.
- Charles X* (1757-1836), Roi de France et de Navarre, dernier petit-fils de Louis XV (1710-74), il succède à ses deux frères, Louis XVI (1754-93) et Louis XVIII (1755-95). Son règne est pour la France une période de stabilité politique et de prospérité économique, qui, en matière de politique extérieure, voit le retour de la France dans le concert des grandes puissances. À l'issue d'une nouvelle révolution parisienne qualifiée de « Trois Glorieuses » (27-29/07/1830), il abdique en faveur de son petit-fils Henri d'Artois évincé par Louis-Philippe d'Orléans (1773-1850), Roi « des Français » renversé en juillet 1848. Il est le dernier Bourbon de la branche aînée à avoir régné ainsi que le 68^e et dernier « Roi de France ».



Jean-Baptiste Colbert
(1619-83)



Sébastien Le Prestre de Vauban
(1633-1707)



Napoléon III
(1808-73)



Charles X
(1757-1836)

Bougival – les conduites d'eau



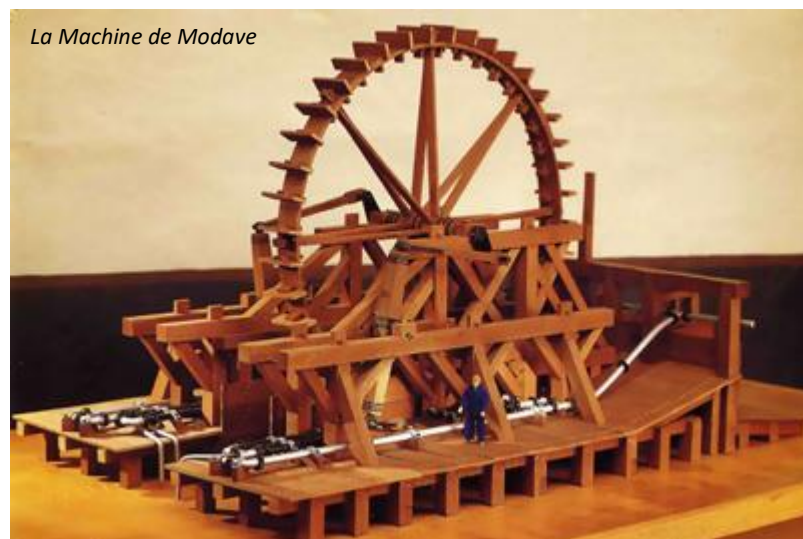
Aujourd'hui³⁻⁶, seuls quelques bâtiments subsistent : le pavillon Charles X⁸ pour le pompage, un petit édicule au milieu de la Seine et quelques logements d'habitation pour le personnel. On peut néanmoins encore admirer les vestiges de ce qui fut une immense prouesse technique du XVIIe siècle : les réservoirs de Marly, l'aqueduc de Louveciennes et la conduite d'eau de Bougival témoignent de l'ambition et de la « *magnificence* » du Roi Soleil de *faire de Versailles le domaine le plus splendide qui soit* et de l'idée folle d'y faire construire une multitude de bassins et de fontaines alimentés par l'eau de la Seine ... qui coule à plus de trois lieues du château, entreprise que « le grand Colbert »^a déclare impossible mais que l'audace des ingénieurs du Grand Siècle associée à l'ingéniosité d'un maître charpentier liégeois et à l'habileté de nombreux artisans wallons ont rendu possible. On disait d'elle que « ***c'est la plus surprenante et la plus admirable (machine) qu'il y ait au monde*** ».

L'homme

Renkin (francisé en Rennequin) *Sualem* est né à Jemeppe-sur-Meuse le 29 janvier 1645 dans une famille de charpentiers⁷⁻⁹. Il côtoie très vite le monde des houillères liégeoises confrontées au problème récurrent de l'évacuation des eaux usées.

- Modave

La réédification du château de Modave par *Jean Gaspard de Marchin* (1601-73)¹⁰, situé entre Liège et Namur, va offrir à Rennequin la chance de montrer ses compétences aux maîtres charpentiers liégeois



La Machine de Modave

particulièrement réputés à l'époque^{9,10}.

Le problème s'avère complexe : le château surplombe d'une quarantaine de mètres le Hoyoux, un affluent de la Meuse, dont il faut élever les eaux jusqu'à la demeure du seigneur et des jardins. S'inspirant du principe des machines d'exhaure (machine servant à pomper l'eau des mines), il met au point vers 1670 la « *Machine de Modave* » : une

seule roue à aubes actionnant au moyen de balanciers huit pompes horizontales refoulant l'eau dans une conduite unique. L'eau atteint le château et elle jaillit dans le bassin de la cour d'honneur : le défi est relevé ! Une machine de cette puissance était à cette époque considérée comme un exploit.

La tour au-dessus de laquelle les eaux étaient montées existe encore dans la partie supérieure du parc. La hauteur de refoulement est d'environ cinquante mètres.



Le Château de Modave aujourd'hui : vues aérienne et par le bas (niveau du Hoyoux)

Le château de Modave - 1885

- Marly

Arnold de Ville (1653-1722) ¹¹, gérant du domaine de Modave, venu travailler à Paris pour le *Grand Condé* (Louis II de Bourbon-Condé - duc d'Enghien, prince du sang – 1621-86) propose à Louis XIV un projet de pompe pour élever l'eau de la Seine vers le Château du Val, dans la forêt de Saint-Germain. Il la réalise sur des plans de Rennequin Sualem. Cette réussite l'entraîne à proposer au Roi une pompe plus importante pour alimenter en eau les jardins de Versailles, rencontrant ainsi le rêve du souverain. Ce sera la *Machine de Marly*, sur la Seine entre Bougival et Port-Marly dont il fut le promoteur et le maître d'œuvre du projet. Il fait appel pour la conception et la construction aux frères Rennequin et Paulus Sualem.



Arnold de Ville
(1653-1722)

Louis XIV donna à Arnold de Ville une gratification de cent mille livres, une pension annuelle de six mille, et le nomma gouverneur de cette machine avec des appointements annuels également de six mille livres. Quant à Rennequin Sualem, il fut chargé de l'entretien de la machine moyennant une rétribution pas vraiment en rapport avec l'importance de son invention, une pension de quinze cents livres avec un logement à la machine, pension et logement qui furent conservés à sa veuve.

Rennequin Sualem est mort le 27 juillet 1708 à Marly, il est enterré dans l'église de Bougival. Malgré de multiples efforts et tentatives, de Ville ne réussit pas à se faire attribuer « l'invention » de la Machine. Louis VIX ne fut pas dupe, il reconnut l'œuvre de Sualem et ses descendants firent inscrire sur sa pierre tombale « *Cy gissent honorables personnes, sieur Rennequin Sualem, seul inventeur de la machine de Marly* ».

La machine de Mary fonctionna pendant 133 ans et ne fut démontée qu'en 1817 pour être remplacée par une machine à vapeur. Elle restera dans les mémoires comme une véritable prouesse technique, d'autant plus impressionnante que Rennequin était « réputé » illettré ... ce qui ne fut toutefois jamais prouvé.



La Machine

De nombreux articles et ouvrages ont été consacrés à l'étude de la *Machine de Marly* et la décrivent en détail ainsi que son fonctionnement¹²⁻¹⁴. Je me limiterai donc à une présentation plutôt succincte, invitant le lecteur intéressé à consulter les documents référés supra.

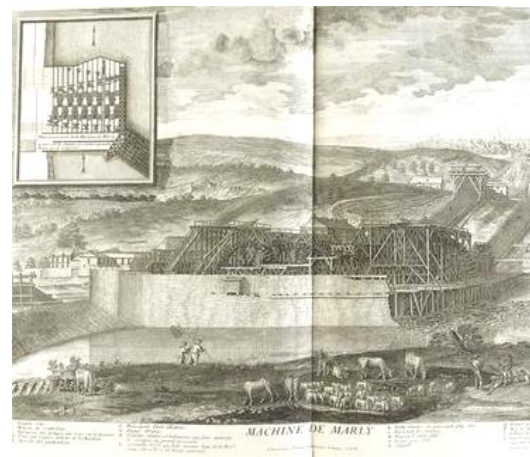
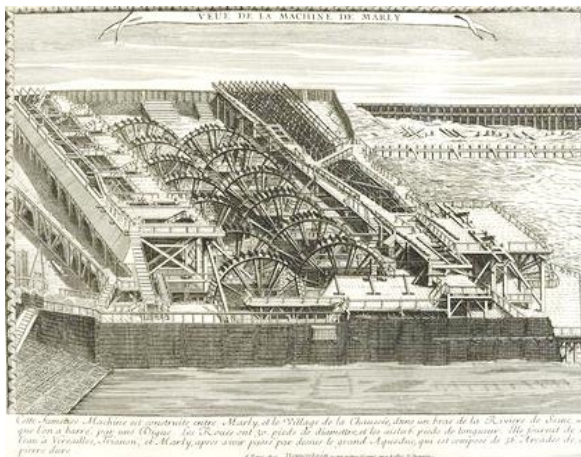
La Plateforme Ouverte du Patrimoine (POP)¹⁵ – Ministère de la Culture Français décrit *l'Ensemble du Génie Civil dit Machine de Marly* de la manière suivante :

- *Localisation* : Île-de-France ; Yvelines (78) ; Bougival ; quai Rennequin Sualem
- *Lieu-dit* : La Machine
- *Nom du cours d'eau traversant ou bordant l'édifice* : Seine (la)
- ...
- *Année(s) de(s) campagne(s) de construction* : 1684, 1827, 1839, 1858, 1894, 1929

- Description historique

L'ensemble du génie civil dit " Machine de Marly " fut bâti pour alimenter en eau de Seine les châteaux de Marly-le-Roi et de Versailles. La machine fut conçue par le chevalier Arnold de Ville qui était allé à Liège requérir l'assistance de Rennequin Sualem. La machine fut inaugurée en présence du Roi Louis XIV le 3 juin 1684 et fonctionna jusqu'au 25 août 1817. La machine mue par le courant du fleuve grâce à 14 roues à aubes (*le chiffre du Roi*) de 12 mètres de diamètre disposées sur 3 lignes parallèles (7 + 6 + 1) aspirait l'eau de la Seine et la refoulait jusqu'à l'aqueduc de Louveciennes grâce à 221 pompes. Après de multiples tentatives de perfectionnement, l'architecte François Cécile et l'ingénieur Louis Martin construisent en 1827 une machine mixte hydraulique et thermique. En 1839, l'ingénieur Poiré construit une écluse pour 6 péniches. En 1858, l'ingénieur Dufrayer construit la dernière machine hydraulique comprenant 6 roues motrices de 12 mètres de diamètre à structure de fer et pales de bois qui actionnaient 24 pompes horizontales. De 1879 à 1883, deux écluses sont construites sous la direction de l'ingénieur en chef Boule. En 1894, des puits de pompage sont creusés dans le sous-sol. En 1929, un puits artésien est bâti. La machine de l'ingénieur Dufrayer est ensuite transformée en partie en centrale électrique. Arrêtée en 1963, la machine est démolie en 1968 à l'occasion du réaménagement de ce bras de la Seine.

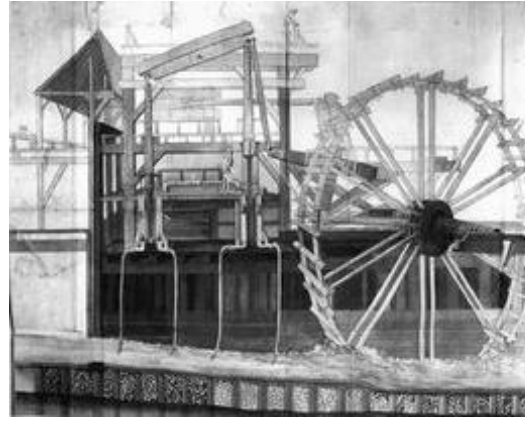
Le mise en œuvre du chantier fut précédée par plusieurs chantiers préparatoires qui ne manquèrent pas non plus de gigantisme. Assez loin en amont, Colbert fit canaliser une partie de la Seine en reliant les îles par des digues depuis l'île de Bezons et séparant ainsi le fleuve en deux bras, un bras occidental laissé à la navigation et un bras oriental destiné à alimenter la machine en créant un rétrécissement et une chute artificielle d'un à deux mètres pour entraîner les 14 roues à aubes de la Machine. Ensemble, le barrage de Bezons et la Machine ont ainsi créé sur le fleuve une chute de 3,10 m utilisée pour réguler le débit alimentant les roues hydrauliques. On notera encore que pour éviter que des matières solides entraînées par le courant de la Seine arrivent sous les roues, un large grillage de fer est placé en travers du canal d'arrivée.



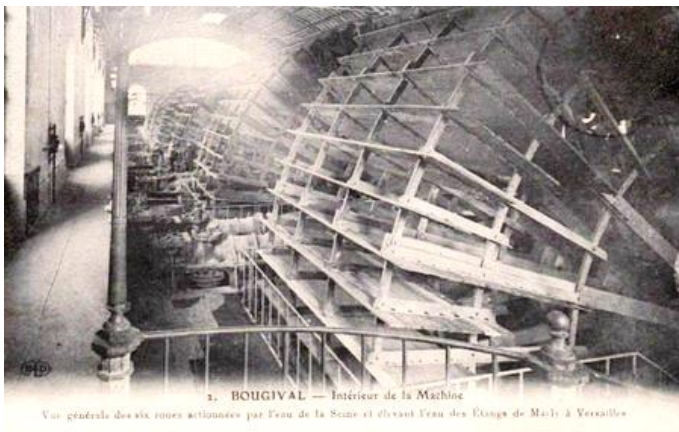
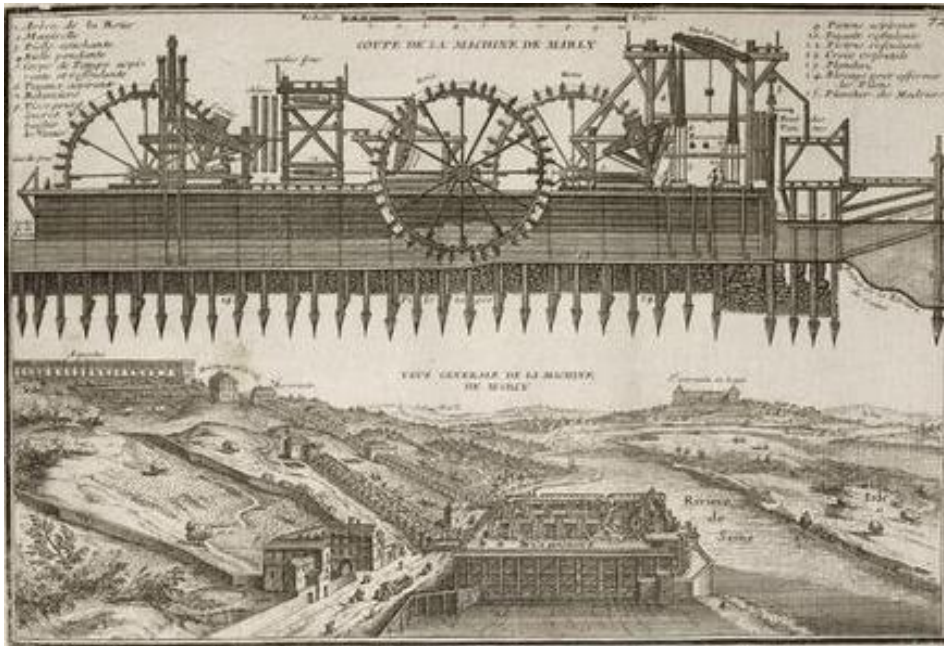
Vue d'ensemble de la Machine de Marly : les 14 roues – vue de profil (à gauche), l'ensemble (à droite)¹⁵



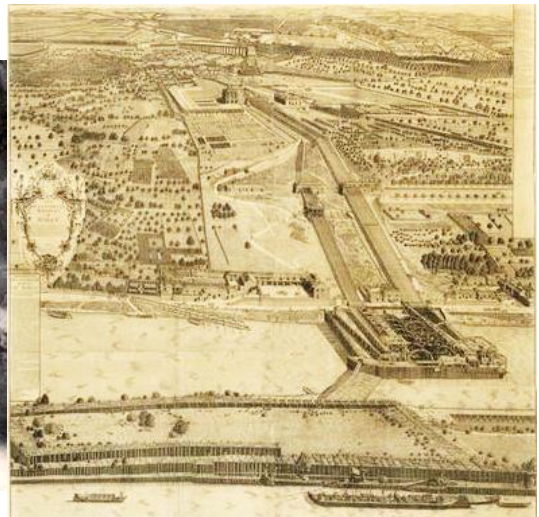
Vue et perspective de la Plus haute de Marly, située sur les bords de la Seine, de Paris



Vue d'ensemble de la Machine de Marly : les 14 roues – vue de face (à gauche), le système pompes - roues (à droite) ¹⁵



1. BOUGIVAL — Intérieur de la Machine
Vue générale des six roues actionnées par l'eau de la Seine et élevées l'eau des Fâges de Marly à Versailles



Les roues qui permettaient d'envoyer l'eau aux pompes Machine de Dufrayer
Vue d'ensemble de l'équipage permettant d'acheminer les eaux de la Seine vers l'Aqueduc de Louveciennes



Vue aérienne de la Machine depuis l'amont (vers 1960)



Louveciennes : l'aqueduc – vue en perspective

La Machine est une prouesse technologique remarquable, ce qui s'est fait de mieux à l'époque dans le domaine de la construction hydraulique.

Dès que Louis XIV eut exprimé le souhait de faire alimenter les hauteurs de Versailles en prélevant de l'eau à l'extérieur du parc, une foule de projets apparurent, plus « surprenants » les uns que les autres ! Le plus gigantesque fut celui proposé par *Pierre-Paul Riquet* (1609-80)¹⁶, entrepreneur concepteur et réalisateur du *Canal du Midi*¹⁶, qui proposa rien moins qu'*amener la Loire à Versailles*. L'impossibilité physique d'une telle réalisation fut démontrée par l'abbé *Jean Picard* (1620-82)¹⁶, géodésien et astronome, l'un des vingt-et-un premiers membres de l'Académie royale des Sciences, célèbre pour avoir mesuré l'arc de méridien entre Paris et Amiens avec une très grande précision.

Le Roi fit alors venir son architecte favori *Jules-Hardouin Mansart*¹⁶ (1646-1708, surintendant des Bâtiments du Roi : on lui doit plusieurs parties des châteaux de Versailles et de Marly ainsi que de l'hôtel des Invalides et le Pont Royal à Paris, ...) et son ministre Colbert^a pour leur déclarer « *la Seine est à une lieue* d'ici, au bas du coteau de Louveciennes ; faites-lui escalader le coteau, vous établirez là un réservoir et un aqueduc. Quant à la machine qui doit faire monter l'eau de la Seine, demandez-la aux savants de France.* » « *Je m'adresserai demain aux savants de France et l'eau montera jusqu'au ciel s'il plaît à Votre Majesté* » répondit Mansart.



Jules-Hardouin Mansart (1646-1708)

Plus facile à dire qu'à faire . . . ni vapeur ni électricité à l'époque, la seule source d'énergie disponible est le courant de la Seine. Il faudra donc uniquement « compter sur lui », l'utiliser intelligemment pour faire fonctionner la machinerie susceptible de prélever l'eau souhaitée et l'amener à Versailles. Comme signalé, le problème est de taille puisqu'il faut « vaincre » un dénivelé de plus de 150 m, nettement supérieur à ce que les pompes contemporaines les plus performantes peuvent surmonter, à peine 50 m ! Il va donc falloir ruser . . . et faire preuve d'énormément d'inventivité !

Ayant eu connaissance de la compétence du baron *de Ville* en techniques hydrauliques, réputation acquise en Hollande, il retint son projet et lui en confia l'exécution. *de Ville amena avec lui Renkin Sualem* et tenta vainement de se faire attribuer la réalisation de la Machine, le Roi lui-même ayant reconnu le rôle du Liégeois. *Bernard Forest de Bélidor*** (1698–1761)¹⁶, ingénieur français spécialiste des travaux de fortification et d'architecture civile, présente Rennequin comme le véritable inventeur dans son *Traité d'architecture hydraulique* publié en 1739 même si des écrivains contemporains ont écrit le contraire. On estime que pour faire jaillir de l'eau à Versailles, les travaux ont coûté un peu plus de 3 millions de livres (somme estimée équivalente à plus de 75 millions d'euros)¹⁷ et que le coût de fonctionnement annuel s'est élevé jusqu'à la mort de Louis XIV à un peu moins de 50 000 livres (équivalents à environ 1 million 300 mille euros).

Démesurée et (très) bruyante, la machine de Marly était assurément un ouvrage politique, lié à la grandeur de Versailles, destiné à participer à la gloire et à la magnificence de Louis XIV.



La tour du Levant, à l'extrémité septentrionale où arrivait l'eau de la machine de Marly



La tour du Jongleur, à l'extrémité méridionale Est d'où partait un siphon vers les bassins de Marly et de Louveciennes



L'accès à la tour du Levant



L'intérieur de la tour du Levant



Une canalisation où circulait les eaux de la Seine

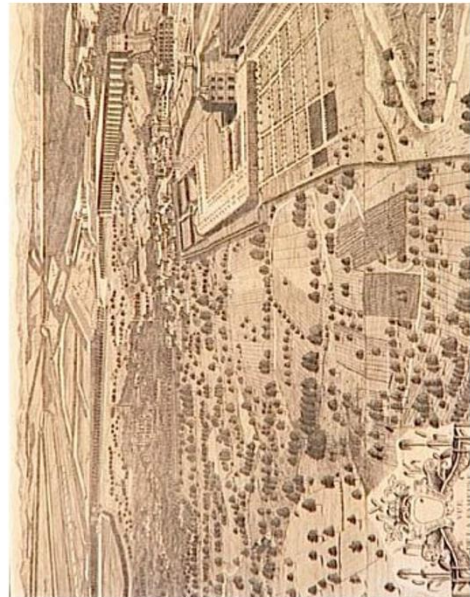
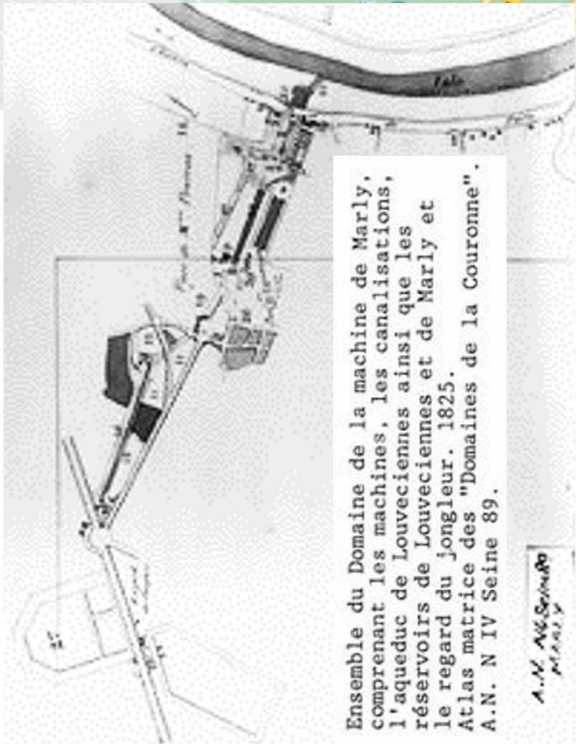
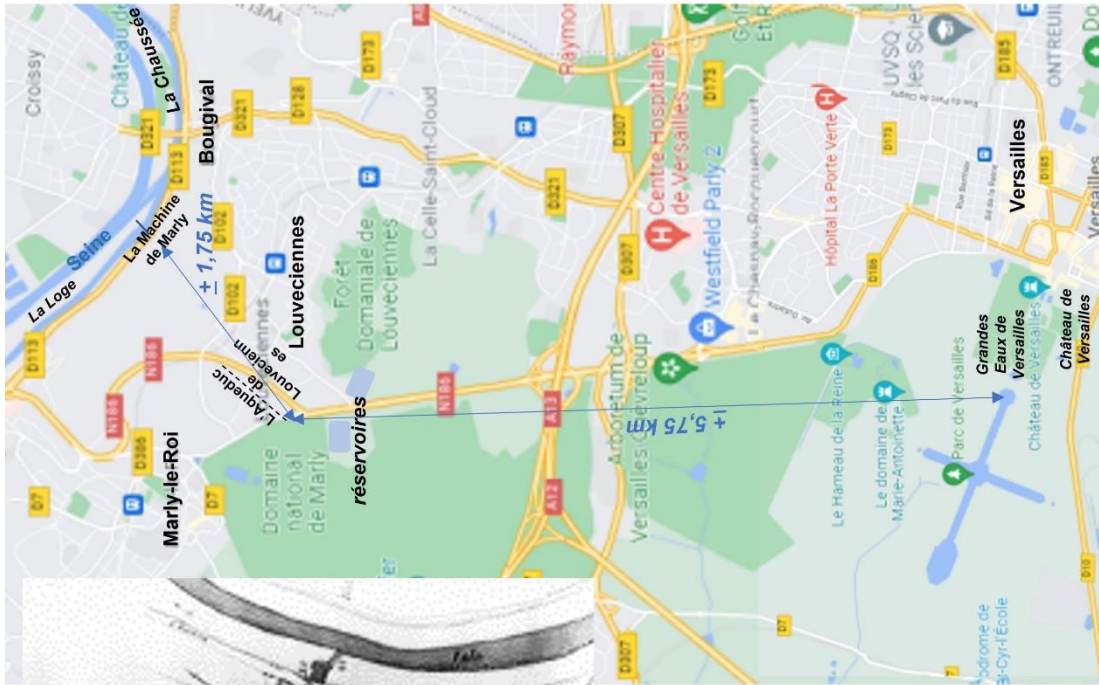
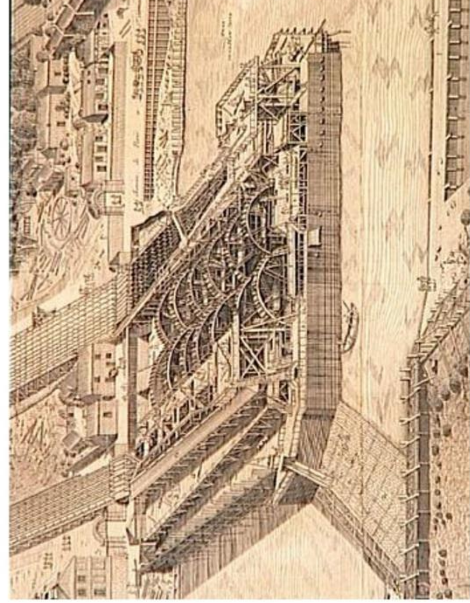
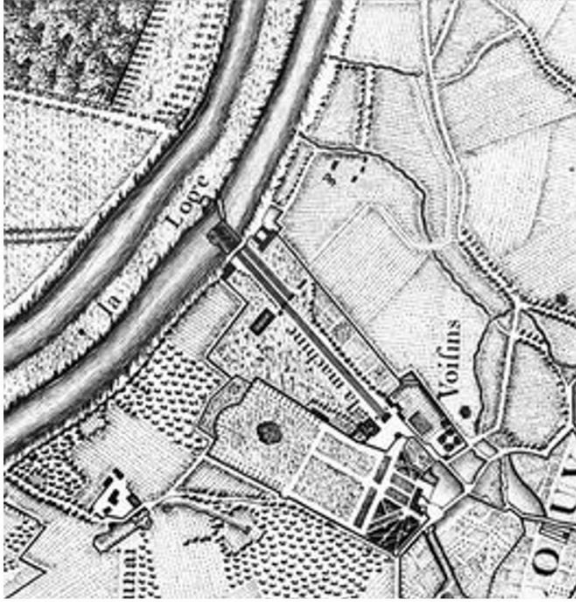
Pour résumer le fonctionnement de la Machine sans trop entrer dans le détail, nous allons tenter une approche ludique en suivant le trajet d'un volume \mathcal{V} d'eau de la Seine qui parcourt la branche située au sud des îles de la Chaussée et de La Loge, là où se trouve la partie immergée du mécanisme, entre Bougival (à l'est, en amont) et Le Port-Marly (à l'ouest, en aval). Admettons plus précisément que le volume \mathcal{V} est une « tranche » d'eau d'une certaine épaisseur, perpendiculaire à l'axe du fleuve, se déplaçant dans le sens du courant.

Les îles entre Bezons et Marly ayant été réunies par des barrages munis de vannes, la « branche sud » de la Seine était parfaitement « isolée » : \mathcal{V} ne pouvait que rencontrer la jetée et les 14 roues à aubes qui barraient le bras du fleuve. Le courant « régulé » par la chute d'eau d'un barrage de 2 mètres de dénivelé situé en amont, actionnait les roues de manière « plus ou moins uniforme », hors crues.

Restait à transmettre l'énergie hydraulique ainsi produite aux pompes, ce qui n'était pas la moindre des difficultés à surmonter. Un système de bielles-manivelles associé aux roues transformait le mouvement de rotation des roues en un mouvement rectiligne alternatif qui actionnait 259 pompes « aspirantes-refoulantes » installées sur trois niveaux à flanc de coteau via un ingénieux enchevêtrement de jeux de bras oscillants principalement construits en bois, de tringleries et d'équerres en fer.

*) une lieue de l'Ancien Régime égale ± 4828 mètres

**) Bernard Forest de Bélidor - Commissaire Provincial d'Artillerie, , *Architecture Hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie, Tome second, Livre troisième, Où l'on enseigne la théorie des pompes, la manière de les mouvoir, et la description de plusieurs belles machines pour élever l'eau*, Chapitre IV : De la théorie des pompes où l'on décrit plusieurs machines pour élever l'eau par le moyen des pompes, Description de la Machine de Marly, pp. 195-205 ; à Paris rue S. Jacques, chez Charles-Antoine Jombert, Librairie de l'Artillerie et du Génie, à l'Image Notre-Dame - M.DCC.XXXIX (1739) avec approbation et privilège du Roy.



Plan du site Marly – Bougival – Louveciennes – Versailles

L'étanchéité des pompes de l'époque ne permettait pas d'amener l'eau du fleuve à 165 m au-dessus de son niveau, sur une distance de 1200 m, en une fois, ni en deux : les cuirs des pistons n'auraient pas résisté à la pression 16,2 bars (1,62 MPa) *. *L'astuce, et le mot est faible*, fut de diviser la montée en trois paliers de ±50 m avec deux puisards creusés à 49 et 99 m au-dessus du niveau du fleuve, et deux bassins intermédiaires, eux-mêmes munis de pompes (soumises à ±5,4 bars = 0,54 MPa). Seules 221 pompes intervenaient effectivement : une partie de l'eau de \mathcal{V} était pompée dans la Seine par 64 pompes et amenée dans le premier réservoir par cinq conduites ; 79 pompes envoyaient ces eaux dans le second réservoir d'où une troisième série de 78 pompes les élevaient jusqu'au réservoir au sommet de la colline. Une trentaine de pompes auxiliaires servaient à la lutte contre les incendies et à l'élévation des eaux de sources captées sur le coteau. L'eau effectuait une dernière remontée dans la Tour du Levant comportant un réservoir intérieur, sorte de château d'eau de 24 m de hauteur, départ de l'Aqueduc de Louveciennes : 640 m de longueur en légère déclivité, ± 20 m de hauteur, 26 arches. À l'autre extrémité de celui-ci, la Tour du Jongleur, 16 m de hauteur, également nantie d'un réservoir à partir duquel la gravité amène l'eau dans des réservoirs à Marly et Louveciennes et ensuite jusqu'aux bassins de Versailles via des jeux de syphons et de tuyauteries, environ 35 m plus bas.

La performance fut de réussir à transmettre l'énergie utile aux pompes installées aux niveaux des réservoirs supérieurs, ce que l'on n'avait apparemment jamais réalisé à l'époque. On ne peut que saluer et s'émerveiller de l'ingéniosité et de l'audace de ceux qui ont imaginé, conçu et réalisé cette « Machine ».

Malheureusement, ce remarquable édifice, monument de technologie et de génie, principalement construit en bois et comportant une multitude d'éléments mobiles de transfert, nécessite un entretien pléthorique et engendre ses propres faiblesses, celles qui causeront sa dégradation relativement rapide. Son rendement « tombera » à 25% à la fin du 18^e siècle.

*La puissance théorique de la machine était de 700 chevaux environ (≈ 515 kW) et son débit théorique maximal de 6 000 m³ (6 millions de litres) par jour***. La pratique a montré que la première valeur est « très optimiste » comparée à ce qui fut obtenu sur le terrain ; la seconde ne sera jamais atteinte dans la réalité. Ces chiffres peuvent paraître dérisoires alors que nous parlons quotidiennement de centaines, voire de milliers de MW (mégawatts). Et pourtant le résultat était exceptionnel à l'époque : *il faut noter qu'il s'agissait d'un véritable tour de force pour l'art mécanique du XVIII^e siècle, qui éblouit toute l'Europe et attira de nombreux visiteurs prestigieux, admiratifs, à Versailles ... et à Marly*.

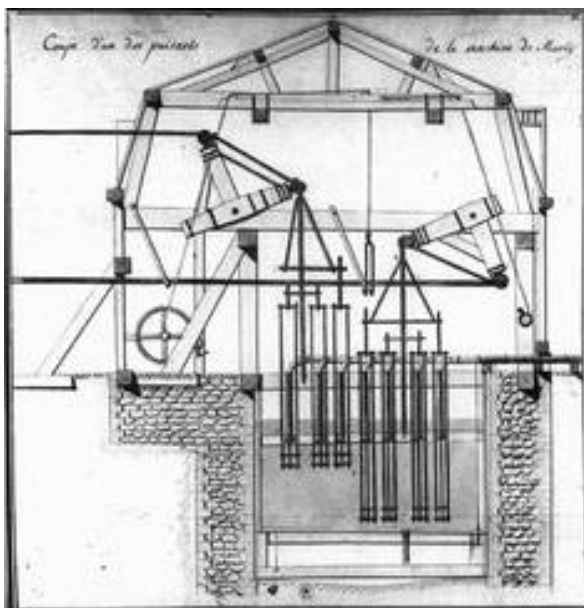
La construction de la Machine a mobilisé des moyens impressionnants : 16 000 tonnes de fer, 83 000 tonnes de bois (provenant des forêts de France), 860 tonnes de cuivres et autant de plomb, de nombreuses pièces détachées et tuyaux de fonte importés de Wallonie, en particulier de Liège.

Le débit est évalué à 6000 mètres cubes par jour mais dans les faits, il ne dépassera jamais les 3000 mètres cubes. La plus grande partie de cette eau est réservée au château de Marly, le surplus est reversé à Versailles.

Sans tenir compte des problèmes de réapprovisionnement en bois et en fonte nécessaires aux réparations, la machine de Marly demande énormément d'entretien. Une équipe de soixante ouvriers sous les ordres d'un contrôleur, en prend soin. En 1793, *Gaspard de Prony* (1755-1839 – ingénieur des Ponts et Chaussées, un des fondateurs de l'Ecole Polytechnique, directeur de l'Ecole des Ponts et Chaussées) ¹⁸ dénonce le mauvais fonctionnement de la machine. Bien que considérée comme la huitième merveille du monde, elle est démontée le 25 août 1817 sur décision d'une commission nommée par Napoléon 1^{er} *mais ne cessera pas pour autant de faire parler d'elle* . . . Après plusieurs améliorations et remplacements, elle disparaît finalement en 1967.

*) 1 Mégapascal = 10⁶ Pa = 1 000 000 N/m² [unités SI] = 10 bar [unité cgs]

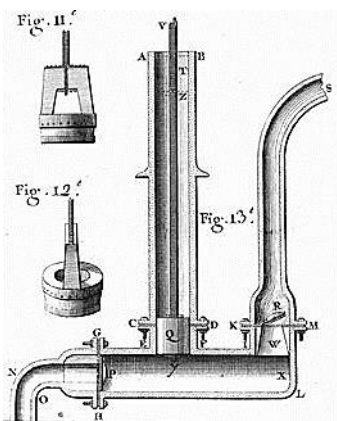
***) Le lecteur intéressé, que quelques formules et calculs ne rebutent pas, trouvera des informations complémentaires en annexe.



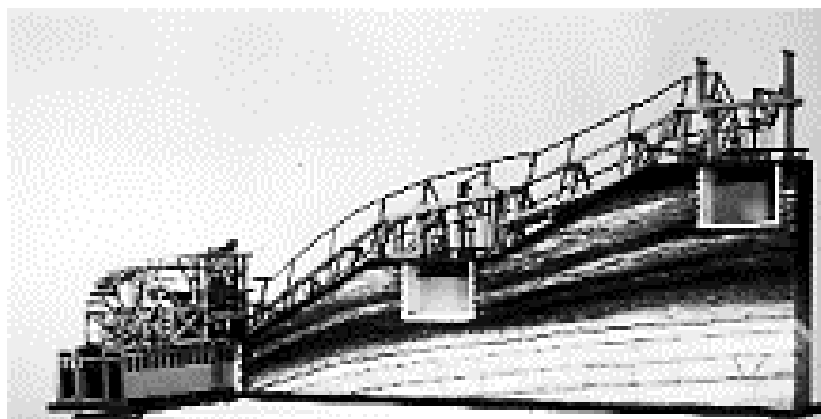
Coupe transversale d'un pousard ¹⁴



Maquette d'un pousard ⁷



Coupe d'une des pompes (Bélicor)¹⁴



Modèle de la Machine – échelle 1/25 ⁷

Pour conclure, on rappellera que le Roi, époustoufflé par le génie de Renkin Sualem, a plusieurs fois exprimé sa sympathie pour cet homme simple, s'exprimant dans son patois wallon. On raconte que, alors que le Roi lui demandait comment il avait eu l'idée de cette machine, il lui aurait répondu : « Tot tuzant, sire » (en y réfléchissant, sire).

Il fut nommé « Premier Ingénieur du Roy », gratifié d'une pension et chargé de l'entretien de la Machine. On lui confia aussi d'autres chantiers du même type, notamment à Saint-Cyr et à Decize en Bourgogne.

Références

1. - Cyril Pasquier, *La Machine de Marly – Destination Versailles*, 13/09/2019 – PDF, <https://architrave.hypotheses.org/1232>
- *La fantastique machine de Marly | J'aime mon patrimoine (jaimemonpatrimoine.fr)*
2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydraulique_du_parc_du_ch%C3%A2teau_de_Versailles
https://fr.wikipedia.org/wiki/Parc_de_Versailles ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Jardin_de_Versailles
3. <https://curieuseshistoires-belgique.be/la-machine-de-marly-de-rennequin-sualem/>
4. [BougivalLa Machine de Marly - Bougival \(tourisme-bougival.com\)](http://BougivalLa_Machine_de_Marly_-_Bougival_(tourisme-bougival.com))
<https://www.yvelines-infos.fr/xavier-dufrayer-le-magicien-de-leau/>
5. Machine de Marly : présentation – André Le Nôtre, <https://andrelenotre.com/machine-de-marly/>
6. Claude Wenzier, *Généalogie des Rois de France et épouses royales*, éditions Ouest-France (2012)

7. La Machine de Marly, Collections du Musée des Arts et Métiers (<http://www.arts-et-metiers.net>), <https://www.arts-et-metiers.net/musee/modele-machine-de-marly> http://www.techmania.fr/musee_arts_metiers/1001_carnet_machine_marly.pdf
8. - Julien, *Renkin Sualem 1^{er} ingénieur du Roy*, Éditions Cebedoc, Liège (1992)
- René Cahay, *L'histoire de RENKIN Sualem racontée en BD par Julien* (suggestion de Nicolas Maurice Dehousse et Maggy Warnimont, ULiege), Science & Culture, Bull. n° 487, Avril 2022, pp.43-45
- Embarcadère du Savoir – Calendrier 2021, *Dossier pédagogique : mai : La force de l'eau*, pp.18-21, https://www.embarcaderedusavoir.uliege.be/upload/docs/application/pdf/2021-01/dossier_peda_2021.pdf
9. https://fr.wikipedia.org/wiki/Rennequin_Sualem <http://connaitrelawallonie.wallonie.be/fr/wallons-marquants/dictionnaire/sualem-rennekin>
10. https://www.modave-castle.be/roue_hydraulique, https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Gaspard_Ferdinand_de_Marchin
11. <https://www.histoire-des-belges.be/quelques-celebrites-belges/rennekin-sualem> https://fr.wikipedia.org/wiki/Arnold_de_Ville
- Edouard Poncetlet, *Lettres inédites et mémoires du baron de Ville touchant la machine de Marly*, Bulletin de la Commission royale d'Histoire, 98 (1934), pp. 239-310 https://www.persee.fr/doc/bcrh_0001-415x_1934_num_98_1_1849
12. - *La Machine de Marly et l'Aqueduc de Louveciennes*, Bertrand – French Baroudeur (16/09/2019), <http://french-baroudeur.com/la-machine-de-marly-et-laqueduc-de-louveciennes/>
- Pierre Biard et Françoise Chesneau, *Guide de la France savante*, éd. Belin (2008), p.276
13. https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_de_Marly
14. *Les eaux du domaine de Versailles au 17^e siècle*, <http://laurentour7.canalblog.com/archives/2011/05/04/21056271.html>
15. <https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/IA00051765>
16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre-Paul_Riquet, https://fr.wikipedia.org/wiki/Jules_Hardouin-Mansart, https://fr.wikipedia.org/wiki/Canal_du_Midi, https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean_Picard, https://fr.wikipedia.org/wiki/Bernard_Forest_de_B%C3%A9lidor
17. <https://convertisseur-monnaie-ancienne.fr/>
18. https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaspard_de_Prony
19. - Michel Chevalet, *Comment ça marche ? – Fantastique Machine de Marly*, vidéo (7 juillet 2012) <https://chroniques.amisdeversailles.com/fantastique-machine-de-marly/>
- Géraldine Chopin, *La Machine de Marly*, conférence (3 avril 2021) ; *découvrez le nouveau parcours du musée du Domaine royal de Marly*, conférence (25 juillet 2020) - Les Chroniques des Amis de Versailles <https://www.youtube.com/watch?v=iRoTcsgVkg8> , <https://www.youtube.com/watch?v=LSelChgnpY8> , <https://www.youtube.com/watch?v=Xb877ujxlpC> ,
- Jamy Gourmaud et Frédéric Courant, *C'est pas Sorcier - Sous le Soleil de Versailles*, mars 2014, présentation Sabine Quindou, <https://www.youtube.com/watch?v=XFmG6ku-C8g>

Les références 7 et 14, parmi plusieurs autres, présentent de manière très détaillée la construction, les caractéristiques et le fonctionnement de la Machine. La référence 19 en propose des animations très réalistes.

Annexes

Comment ça marche : Essai d'interprétation ?

Peut-on démêler le vrai de l'à peu près, voire du faux ?

Quelques chiffres, plausibles . . . ou non, qui illustrent le gigantisme de l'entreprise
J'ai failli dire « la monstruosité de l'entreprise » mais la qualification serait « négative » ce qui n'est absolument pas mon propos

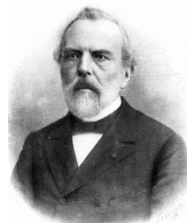


Bernard Forest de Bélidor (1698-1761)

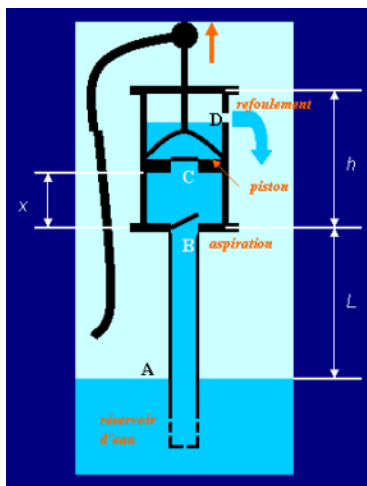
Les données paramétrées des composants de la Machine de Marly sont rares. Même si les descriptifs sont nombreux, ils sont peu explicites donc difficilement exploitables « théoriquement ». Pour pallier cette absence, nous nous sommes inspirés des valeurs plus précises fournies pour la Machine de *Dufrayer* et tenté de les adapter à celle de *Renkin* en comparant les schémas disponibles et en s'en tenant à ce qui est comparable. Les résultats ainsi obtenus fourniront plus probablement des ordres de grandeur plausibles que des résultats exacts. Nous ne retiendrons que ceux correspondant à des données présentées par des « auteurs contemporains fiables »¹, ou postérieurs, ayant analysé la mécanique des roues à aubes en détail. Parmi ceux-ci, nous retiendrons particulièrement les travaux de *Jean-Victor Poncelet*², mathématicien, ingénieur et général commandant de l'École polytechnique (1848-50), inventeur du modèle de turbine éponyme. Ses travaux furent affinés par l'astronome et mathématicien liégeois *François Folie*³, premier titulaire d'un cours de géométrie supérieure à l'Université de Liège, cours qu'il institua également dans les autres universités. Il fut aussi directeur de l'Observatoire Royal de Belgique dont il initia et supervisa les travaux de la construction des locaux à Uccle. Plus récemment, *Muller et al.* ont proposé une approche exploitant des moyens technologiques modernes^{4,5}. Nous n'entrerons pas dans le détail du fonctionnement des pompes trop peu documentées dans les descriptifs de l'époque^{1,6}. Rappelons simplement qu'à l'époque, leur étanchéité ne permettait pas d'amener l'eau de la Seine à 165 m au-dessus de son niveau, les pistons n'auraient pas résisté à la pression de 16 atm (1,62 MPa) correspondante. On peut néanmoins déduire des informations qu'elles agissaient jusqu'à 55 m, résistant à une pression de 5,5 atm (0,538 MPa).



Jean-Victor Poncelet (1788-1867)

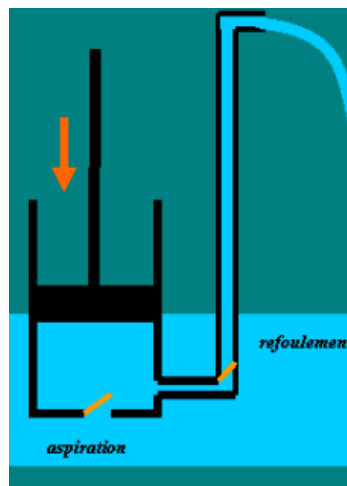


François Folie (1833-1905)



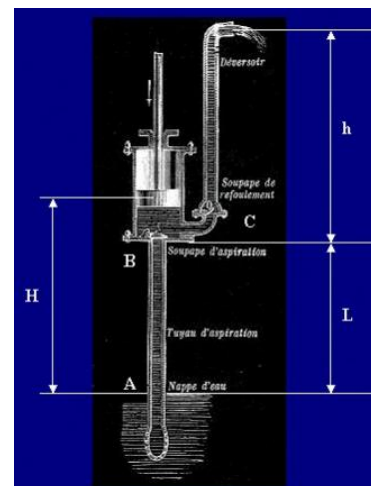
Pompe aspirante : à chaque montée du piston, le corps de pompe s'emplit d'eau et un volume égal s'écoule par le déversement D

$L < 10,30$ m : hauteur d'eau qui compense la pression atmosphérique⁶



Pompe foulante : à chaque montée du piston le cylindre s'emplit d'eau.

Cette quantité d'eau est ensuite refoulée dans le canal de refoulement lorsque le piston descend (les pistons sont représentés en orange)⁶



Pompe aspirante-foulante : l'eau est aspirée via la soupape B à la montée du piston, puis elle est refoulée via la soupape C à la descente du piston : pour faire monter l'eau d'une hauteur h dans le canal de refoulement, il faut exercer une poussée F/S [Pa = N/m²]

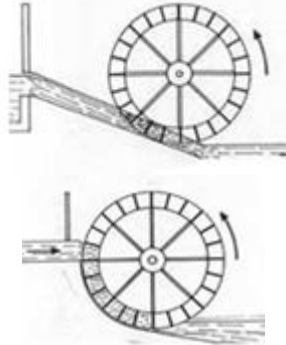
$$= \rho g(h - (H - L)) \text{ [N/m}^3 \times \text{m]}^6$$

ex. : $L = 50$ cm, $H - L = 20$ cm, $h = 1$ m $\Rightarrow F = 246$ N

Les *roues hydrauliques* captent l'énergie de l'eau en mouvement. Plusieurs dispositions sont possibles en fonction de la configuration du terrain. Trois cas sont habituellement retenus ⁷ :

- le dispositif « à la gentille » ou « par en-dessous » : la roue absorbe une partie de l'énergie et guide l'eau – le diamètre de la roue peut être assez grand,
- le dispositif « à la capucine » ou « par en-dessus » : la roue est alimentée par le haut, l'eau agit par son poids – le diamètre de la roue est limité par la hauteur de la chute,
- le dispositif « à axe vertical » réservé à des utilisations spécifiques.

Les roues de la Machine de Marly sont une « forme archaïque » de la famille « par en-dessous » ⁸.



Roues hydrauliques « par en-dessous », haut, et « de poitrine », bas
Roue Poncelet ⁹



Roue hydraulique « par en-dessus »



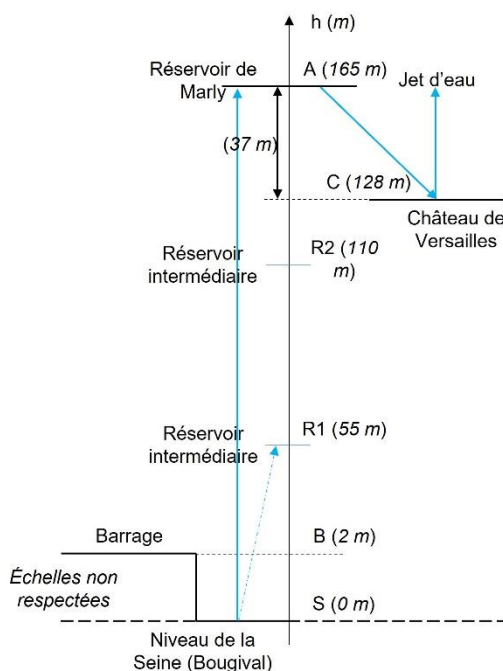
Roue hydraulique « à axe vertical »
Roue Fontaine ⁹

- Quelques considérations préliminaires ¹⁰

Comme signalé, les données « expérimentales » disponibles sont rares et indirectes. Elles se limitent à l'évolution $P(t)$ de la puissance de la Machine au cours de ses 125 années de fonctionnement, déductibles de celle des débits d'eau fournis pendant cette période. Comme signalé, les résultats déduits seront donc plus des ordres de grandeurs que de valeurs précises, ordres de grandeurs dont on estimera la plausibilité en les confrontant aux valeurs de paramètres analogues disponibles dans des documents d'époque ou relatifs aux installations qui ont remplacé la Machine de *Renkin Sualem*, souvent mieux documentées que celle-ci tout en présentant des analogies exploitables. Ces comparaisons ont permis d'estimer les valeurs de paramètres tels que le moment d'inertie J et la

masse M des roues à aubes supposées être toutes identiques . . . , hypothèse qui ne correspond probablement pas à la stricte réalité mais qui permet d'élaborer un modèle « acceptable » du fonctionnement de la machine.

On dispose également de données relativement précises de la topologie des lieux, schématisées dans le graphe ci-contre.



Lors de sa construction, la Machine était réputée avoir une puissance théorique P_{th} de l'ordre de 700 CV [1CV = 736W] et un débit théorique maximal de 6000 m³/jour, qu'elle n'atteignit jamais [rendement initial $\eta = P_{effectif} / P_{th} = 83\%$ (environ)] et qui diminua rapidement en raison des nombreuses sources de pertes par frottements, usure particulièrement des composants en bois, des multiples bielles, tringles et autres mécanismes de transmission intervenant entre les roues et les pompes. La production initiale de 5000 m³/jour chuta à 2 - 3000 m³ au milieu du XVIII^e. Ce rendement insuffisant poussa assez rapidement à la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement pour le parc de Versailles et au lancement de la construction du canal

sources d'approvisionnement pour le parc de Versailles et au lancement de la construction du canal

de l'Eure . . . qui ne fut jamais achevé. Dès 1685, l'usage de la Machine était presque entièrement réservé aux jardins du château de Marly et aux fontaines de certains hôtels particuliers de versaillais. En un peu plus d'un siècle, le rendement est passé de $\pm 80\%$ à moins de 25 - 30% ; $\pm 13\%$ en 1798 (640 m³/jour), moins de 5% en 1803 (240 m³/jour). Le tableau 1 résume ces données ¹⁰.

Durée		Puissances			Puissance [W] par roue (*)	P / P(0)
Dates	[années]	[%]	[CV]	[W]		
1680	0	100	700	515200	36800	1
1685	5	83,33	583,33	429333	30666,65	0,8333
1730	50	50	350	257600	18400	0,5
1750	70	33,33	233,33	171733	12266,65	0,3333
1790	110	10,83	75,83	55813	3986,65	0,1083
1805	125	4	28	20608	1472	0,04

*) toutes les roues sont supposées identiques, ce qui n'est fort probablement pas vrai mais simplifie l'approche

Tableau 1

- Quelques réflexions à propos du système hydraulique ¹¹

Le problème consistait à faire monter, en trois étapes d'environ 55 m de dénivellation chacune, l'eau de la Seine (altitude ~ 30 m) jusqu'au sommet d'un aqueduc (altitude ~ 195 m), soient 165 m de dénivellation sur une distance de 1200 m. De là, l'eau s'écoulait par gravité vers de grands réservoir de stockage qui alimentaient par une pente douce les jeux d'eau du parc de Versailles. Initialement, la Machine devait fournir 6000 m³ d'eau par jour. Elle ne dépassera jamais 5000 m³. Elle se composait de 14 roues à aubes de 12 m de diamètre actionnées par la chute d'eau d'un barrage de 2 m de dénivélé en amont. Les roues actionnaient 259 pompes.

Une galerie revêtue en plomb de 2 m de hauteur sur 1 m de large, au sommet de l'aqueduc, conduisait les eaux vers les réservoirs de Louveciennes et des Deux Portes à Marly, d'une capacité de près de 700000 m³. Leur niveau est à 37 m au-dessus des bassins de la terrasse du Château de Versailles. Un aqueduc souterrain, en pente douce, long de 6 km les y amenait par gravité.

Dans la suite, l'origine des altitudes sera placée au niveau de la Seine ce qui permet de représenter schématiquement les différents niveaux sur la figure supra.

En considérant dans une première approche qu'il n'y a aucune perte d'énergie par frottement et que l'énergie d'une masse M d'eau tombant du barrage est par la suite intégralement utilisée pour la montée des 5000 m³ d'eau, nous allons calculer

- l'énergie mécanique de la masse M d'eau du barrage au cours de sa chute,
- en déduire le volume total d'eau V_{bar} qu'il faut lâcher du barrage de la Seine pour monter quotidiennement le volume de 5000 m³ en haut de l'aqueduc,
- calculer la puissance développée par une roue de la machine dans ces conditions.

Quelques rappels préalables : $\rho_{H_2O} = 997$ [kg/m³] ; $g = 9,81$ [N/kg] ou [m/s²] ;

- 6000 m³ = 5,982.10⁶ kg = 5,982 Mkg ; 5000 m³ = 4,985 Mkg ; 3000 m³ = 2,991 Mkg

- en **B** : $h_B = 2$ m, $p_B = p_{atm}$; en **S** : $h_S = 0$, $p_S = p_{atm}$; en **A** : $h_A = 165$ m, $p_A = p_{atm}$; en **R1** : $h_{R1} = 55$ m, $p_{R1} = p_{atm}$; en **R2** : $h_{R2} = 110$ m, $p_{R2} = p_{atm}$; en **C** : $h_C = 128$ m ; en **J** : $v_J = 0$; $L(AC) = 6$ km

- théorème de Bernoulli : $E_m = E_{pot} + E_{cin} + W_{fp} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + pV = cte$

$$\rightarrow \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + p = cte$$

- Énergie potentielle de pesanteur d'une masse d'eau m amenée respectivement de S en A, de S en R₁, de R₁ en R₂ et de R₂ en A ? $E_p = mgh$

- si $V = 6000$ m³ : $E_p(SA) = 9682764300$ J $\sim 9682,8$ MJ ;

$$E_p(SR_1) = E_p(R_1R_2) = E_p(R_2A) = 3227588100$$
 J = 3227,6 MJ

- si $V = 5000$ m³ : $E_p(SA) = 8068970250$ J ~ 8069 MJ ;

$$E_p(SR_1) = E_p(R_1R_2) = E_p(R_2A) = 2689656750$$
 J = 2689,7 MJ

- si $V = 3000$ m³ : $E_p(SA) = 4841382150$ J $\sim 4841,4$ MJ ;

$$E_p(SR_1) = E_p(R_1R_2) = E_p(R_2A) = 1613794050$$
 J = 1613,8 MJ

- L'énergie mécanique d'une masse M d'eau tombant du barrage ($h = 2 \text{ m}$) = l'énergie pour monter m de S en A

- si $V = 6000 \text{ m}^3$ et $h_A = 165 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SA) = 9682,8 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 493,5 \cdot 10^6 \text{ kg} = 493,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
 $h_{R1} = 55 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SR1) = 3227,6 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 164,5 \cdot 10^6 \text{ kg} = 164,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

- si $V = 5000 \text{ m}^3$ et $h_A = 165 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SA) = 8069 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 411,3 \cdot 10^6 \text{ kg} = 411,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
 $h_{R1} = 55 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SR1) = 2689,7 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 137,1 \cdot 10^6 \text{ kg} = 137,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

- si $V = 3000 \text{ m}^3$ et $h_A = 165 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SA) = 4841,4 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 246,8 \cdot 10^6 \text{ kg} = 246,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
 $h_{R1} = 55 \text{ m}$: $E_{chute} = E_P(SR1) = 1613,8 \text{ MJ} = 19,62 \text{ M}$ et $M = 82,25 \cdot 10^6 \text{ kg} = 82,25 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Il faut donc grosso-modo « utiliser » $82,25 \text{ m}^3$ d'eau de la Seine pour amener 1 m^3 au sommet de l'aqueduc.

- Puissance développée par une roue de la Machine dans les conditions de fonctionnement précédentes

On suppose que toutes les roues interviennent de la même manière :

$P [W] = W [J] / t [s]$; $t = 1 \text{ journée} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$

- si $V = 6000 \text{ m}^3$: le travail total $W = 9682,8 \text{ MJ}$ et $P_{tot} \approx 112 \text{ kW}$ et $P_{roue} \approx 8 \text{ kW}$

- si $V = 5000 \text{ m}^3$: le travail total $W = 8069 \text{ MJ}$ et $P_{tot} \approx 93,5 \text{ kW}$ et $P_{roue} \approx 6,7 \text{ kW}$

- si $V = 3000 \text{ m}^3$: le travail total $W = 4841,4 \text{ MJ}$ et $P_{tot} \approx 56 \text{ kW}$ et $P_{roue} \approx 4 \text{ kW}$

On aurait également pu obtenir le résultat en appliquant la relation $P_{[W]} = Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \Delta h_{[m]}$

$\Delta h = 165 \text{ m}$ et le débit Q valant respectivement 0,069, 0,059 et 0,035 m^3/s pour les trois valeurs de V .

Descente des eaux : on considère le passage de l'eau des réservoirs (A) au Château de Versailles (C), ainsi que le point (J) sommet d'un jet d'eau (la vitesse de l'eau y est nulle). On suppose qu'il n'y a pas de perte d'énergie mécanique lors du parcours de A à C et que l'eau a une vitesse nulle en A.

En raisonnant sur une masse $m = 1 \text{ kg}$ d'eau :

- expression de l'énergie mécanique totale : $E_m = E_{pot} + E_{cin} = mgh + \frac{1}{2} mv^2$

- $E_m(A) = mgh_A + E_{cin}(A) = 1 \text{ kg} \times g \times 165 + 0 [v_A = 0] = 1618,65 \text{ J}$

- $E_m(C) = mgh_C + \frac{1}{2} mv_C^2 = 1 \text{ kg} \times g \times 128 + \frac{1}{2} v_C^2 = 1618,65 \text{ J}$ donc $v_C = 26,94 \text{ m/s}$ et $h_J = 37 \text{ m}$

- en réalité il y a des pertes par frottement et la vitesse en C : $v'_C = 24 \text{ m/s}$

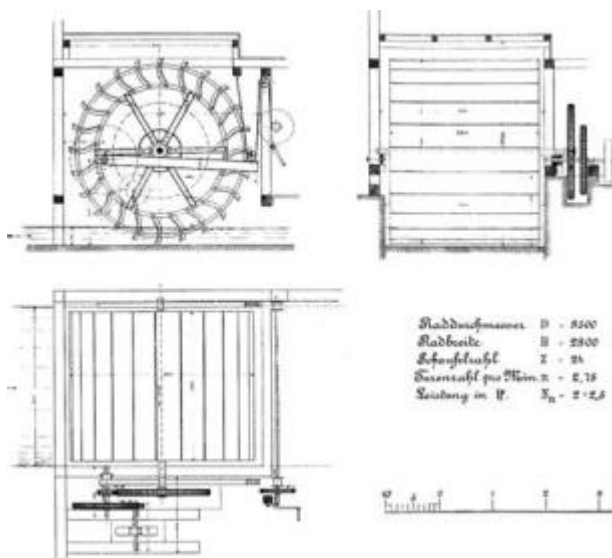
- $E_m(C) = mgh_C + \frac{1}{2} mv'^2_C - W_{ext} = 1618,65 \text{ J}$ et $W_{ext} = 1618,65 \text{ J} - 1 \text{ kg} \times g \times 128 - \frac{1}{2} mv'^2_C = 74,97 \text{ J}$

- $W_{ext} = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{L}(AC) = F_{ext} L(AC) \cos(\vec{F}_{ext}, \vec{L}(AC))$ et $F_{ext} = W_{ext} / L(AC) = 74,97 / 6000 = 0,0125 \text{ N}$:

force opposée au mouvement de la masse de 1 kg d'eau

La relation $\rho gh_B = \frac{1}{2} \rho v_S^2$ donne $v_S = \sqrt{2gh_B} = 6,264 \text{ m/s}$.

- Quelques réflexions à propos de la Machine et de son fonctionnement



Bien que « très optimiste », la puissance théorique initiale peut être justifiée en appliquant des approches développées par J.V. Poncelet, G. Müller et al^{2,4,6}.

Selon la classification de Müller, on se trouve dans le cas de roues en eaux peu profondes permettant d'appliquer la relation

$$P = \rho_{H_2O} g Q \Delta h$$

$$[W] = [kg/m^3][m/s^2][m^3/s][m] = [N \cdot m/s]$$

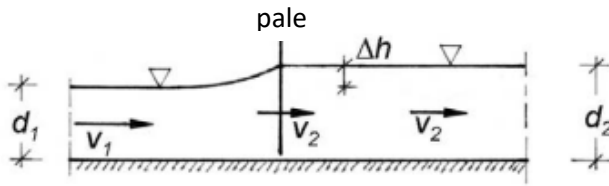
- P est la puissance théorique fournie à la roue,

- ρ_{H_2O} la masse volumique de l'eau = 997 kg/m^3 ,

- g la constante de gravitation = $9,81 \text{ m/s}^2$,

- Q le débit volumique (m^3/s),

- Δh la différence entre le niveau d'entrée de l'eau dans la roue et celui de sortie, estimée de l'ordre de 15 cm à partir des schémas disponibles



On obtient une valeur de $P \approx 37 \text{ kW / roue}$, soient 516 kW pour la Machine, un peu supérieur à 700 CV , donc « plausible ». Les développements sont détaillés sous *) et **)

*) Le débit sur une pale : $Q = v_1 S$, v_1 étant la vitesse du courant « agissant » et S la surface immergée d'une pale estimée égale à 4 m^2 : (hauteur de roue immergée = 2 m) x (largeur = 2 m),

La vitesse $v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$, $h = 2 \text{ m}$ étant la hauteur du barrage en amont et v_0 la vitesse du courant de la Seine avant le barrage. Nous avons retenu $v_0 = 0,5 \text{ m/s} = 1,8 \text{ km/h}$, valeur normale hors crue, disponible dans les tables fluviales¹². On obtient $v_1 = 6,3 \text{ m/s}$ et $v_2 = 5,85 \text{ m/s}$ **. On notera que la valeur de v_1 trouvée par cette approche est « heureusement » la même que celle directement déduite de la relation de conservation au paragraphe précédent.

Les valeurs précédentes correspondent à une vitesse de rotation des roues $\omega_0 \approx 0,974 \text{ rad/s} \approx 9,3 \text{ tours/min}$ **, valeurs compatibles avec les données usuelles d'établissement⁸, et à un couple $C_0 \approx 37,8 \text{ kN.m}$.

**) Les lois de conservation¹³ de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique appliquées à une masse d'eau m passant de la zone 1 à 2 en « poussant la pale au passage », et du débit donnent les relations suivantes :

$mv_1 = mv_2 + J\omega/R$; $\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}J\omega^2$; $d_1v_1 = d_2v_2$; $d_1 = 2 \text{ m}$; $d_2 = d_1 + \Delta h = 2,15 \text{ m}$
 J et R sont respectivement le moment d'inertie de l'élément en rotation de masse M , et le rayon des roues. La masse M est souvent supposée concentrée en un point situé sur l'extrémité du rayon. Cette situation ne correspond pas à la réalité mais permet d'approcher le problème et de se faire une idée « assez réaliste » des grandeurs considérées. En pratique, l'expression de J n'est pas aisée à déterminer surtout si l'on ne dispose pas des paramètres métriques des roues. Diverses formulations sont proposées dans la littérature^{14,15}, nous y reviendrons ultérieurement. Pour simplifier l'approche actuelle, on supposera que M est répartie sur le pourtour de la roue, soit $J = MR^2$.

Considérons une masse d'eau m arrivant avec une vitesse v_1 sur une aube pendant une durée dt , elle possède une énergie disponible $\frac{1}{2}mv_1^2$ et exerce une force F sur l'aube. En sortant de l'aube, l'eau doit conserver une vitesse linéique v_2 suffisante pour ne pas freiner la roue¹⁶ :

$$F \cdot dt = m(v_1 - v_2) \text{ et } F = m \, dv/dt ; C \cdot dt = J \cdot d\omega = J(\omega - 0) \text{ et } C = J \, \omega/dt$$

Pendant dt , l'aube parcourt un arc de longueur $\ell = v_2 \, dt$ et d'angle $d\theta = \omega \, dt$, et F effectue un travail $W = F \cdot \ell = m \, v_2 \, dv = C \cdot \theta = J \, \omega^2$

$$\omega = v_2 \sqrt{\frac{m}{J} \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right)} = \frac{v_2}{R} \sqrt{\frac{m}{M} \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right)} = \frac{v_2}{R} \sqrt{\frac{m}{M} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right)}$$

M est la masse de la pale soumise à l'action de l'eau : $M = \rho_{\text{bois}} \cdot V_{\text{immergé}} = 850 \text{ (chêne)} \times (2 \cdot 2 \cdot 0,15) = 510 \text{ kg}$

Nous avons vu que si le terme sous la racine = 1 : $\omega = \omega_0 = v_2/R = 0,974 \text{ rad/s} \approx 9,3 \text{ tours/min}$.

Estimer $m = 6 \text{ tonnes}$ [¶], introduit un correctif sous la racine = 0,88 et $\omega = 0,914 \text{ rad/s} \approx 8,73 \text{ tours/min}$. On peut affiner l'estimation en considérant l'énergie potentielle associée à Δh qui donne le terme correctif sous la racine = 1,39 et $\omega = 1,147 \text{ rad/s} \approx 10,96 \text{ tours/min}$

$$\omega = \frac{v_2}{R} \sqrt{\frac{m}{M} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) \left(1 + \frac{g \, d_1}{v_2^2} \right)}$$

Les différentes valeurs « corrigées » sont proches. Le manque de précision sur les paramètres initiaux permet donc de supposer que les correctifs seraient peu significatifs et nous retiendrons $\omega_0 = (0,974 \pm 0,173) \text{ rad/s} \approx (9,3 \pm 1,66) \text{ tours/min}$.

¶) Volume du cylindre « enveloppant » une roue (rayon $R = 6 \text{ m}$, $\mathcal{L} = 2 \text{ m}$) : $V = \pi R^2 \mathcal{L} = 226 \text{ m}^3$; chaque roue comporte 12 secteurs remplis à « un peu moins » du tiers, soient $6,2 \text{ m}^3 \approx 6138 \text{ kg}$: la valeur $m \approx 6 \text{ tonnes}$ est donc raisonnable.

- Évolution temporelle de quelques paramètres

La puissance $P(t)$

La perte de puissance consécutive aux frottements peut être exprimée en ajoutant un couple résistant $f_r(t)$ augmentant au cours du temps, aux couples moteur C_m et résistant C_r initiaux, supposés constants, agissant tous sur la roue parallèlement à son axe de rotation. L'absence d'informations pertinentes, relatives aux processus d'évolution des parasites qui affectent le fonctionnement de la Machine et diminuent ses performances, rend difficile le paramétrage de ce processus. *Seule la diminution de la puissance au cours de ses 125 ans de fonctionnement est connue . . . d'une « manière globale et indirecte », via les pertes de débit déclarées plus ou moins périodiquement.* Nous allons donc procéder par *fittage* pour tenter d'approcher le(s) mécanisme(s).

$$P(t) = C(t)\omega(t) = (C_m - C_r - f_r(t))\omega(t)$$

au départ: $P(0) = C_0\omega_0$; $C_0 = (C_m - C_r)$ en supposant (raisonnablement) qu'en $t = 0$:
 $f_r(0) = 0$ et $\omega(t) = \omega_0$

$$f_r(t) = C_0 - \frac{P(t)}{\omega(t)} \quad [1]$$

$f_r(t)$ est un paramètre que je qualifierai (improprement) de « *fourre-tout* » exprimant à la fois

- l'effet des frottements croissants,
- l'effet des dégradations et du vieillissement des multiples composants du système de prélèvement et d'acheminement des eaux de la Seine au sommet du plateau de Marly : les pompes, les leviers, les tringleries et autres éléments intervenant dans la chaîne.

Intuitivement, il évoluerait au cours du temps dans le sens d'une croissance, en même temps que la vitesse de rotation des roues à aubes diminuerait, fort probablement consécutivement à l'accroissement des frottements. Les deux paramètres $f_r(t)$ et $\omega(t)$ seraient donc « *intriqués* », l'évolution de l'un influençant celle de l'autre, les deux évoluant de concert. Il faut donc tenter de traiter les influences de leurs évolutions simultanément.

L'équation différentielle correspondant au ralentissement ¹⁷ (d'une roue) est :

$$J \frac{\partial \omega(t)}{\partial t} = C_0 - f_r(t) = \frac{P(t)}{\omega(t)} \quad \text{soit} \quad \omega(t) \frac{\partial \omega(t)}{\partial t} = \frac{P(t)}{J} \quad [2]$$

et

$$\int_{\omega_0}^{\omega_m < \omega_0} \omega(t) \cdot \partial \omega(t) = \frac{1}{J} \int_{P(0)}^{P(m) < P(0)} P(t) d(t)$$

donc

$$\omega(t) = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{2}{J\omega_0} [P(t) - P(0)]} \quad [3]$$

J [kg.m^2] étant le moment d'inertie de la roue. *Gilbert Gastebois* ¹⁴ suggère $J \simeq MR^2/3$ qui suppose la masse M connue. Une autre hypothèse ¹⁵ serait que M est répartie sur un anneau de rayons extérieur R_{ex} et intérieur R_{in} et $J = M(R_{ex}^2 + R_{in}^2)/2$ *. On notera que dans tous les cas, J ne dépend pas de la largeur des roues, si ce n'est via sa masse M exprimée en fonction du volume V : $M = \rho V$.

À ma connaissance, la seule information relative à M dont nous disposons concerne les roues de la Machine de *Dufrayer* qui comportait six roues de 12 m de diamètre et 4,5 m de large, pesant 120 tonnes ¹⁸, sans-doute plus « lourdes et volumineuses » que celles de *Renkin*. Il s'agit toutefois d'une information utile permettant de se faire une idée de l'ordre de grandeur de ce paramètre.

Moment d'inertie et masse des roues

Les données expérimentales disponibles sont rares et concernent presque uniquement l'évolution temporelle de la puissance de la machine. Elles sont détaillées dans le tableau 1. Nous savons en outre que les roues ont un diamètre de 12 mètres. Nous allons tenter d'exploiter ces informations pour essayer de modéliser le fonctionnement des roues et plus généralement celui de la machine.

*) rappelons qu'au paragraphe précédent, nous avons utilisé une expression « simplifiée » $J = MR^2$

Durée		$P(t)$: puissances / roue [W]			$\omega(t)$: vitesse de rotation [rad/s]		$f_r(t)$ [N·m]		
Dates	[années]	linéaire	poly 2 ^d	expon	linéaire	poly 2	linéaire	calculé	expon
1680	0	33476	34859	36800	0,973	0,975	2500	10,47	0
—	25	26721	25758	23766	0,970	0,970	9400	9236	13034
1730	50	19967	17876	15348	0,966	0,966	16300	17293	21452
—	75	13213	11212	9912	0,963	0,963	23200	24153	26888
—	100	6458	5767	6402	0,959	0,960	30100	29793	30399
1805	125	- 296	1540	4134	0,956	0,958	37000	34193	32666

*) en réalité, la période de 125 ans a été divisée en plages de 5 ans lors du fittage ce qui donnent 26 points « utiles »

Tableau 2

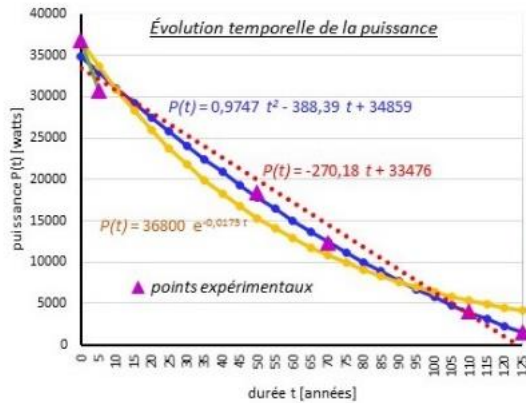


Figure 1

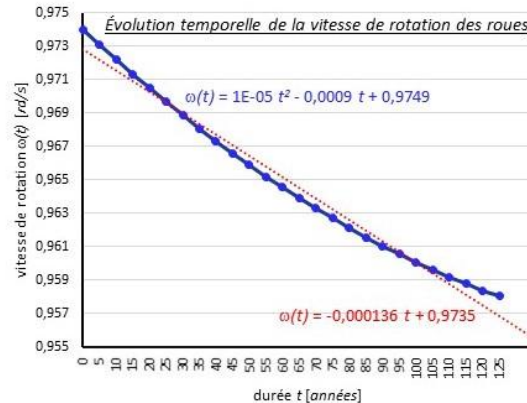


Figure 2

La première étape consistera à préciser l'évolution de $P(t)$ en la modélisant de trois manières représentées sur la figure 1 : par

- un *fittage linéaire* (courbe rouge) qui s'il ne représente pas l'évolution « réelle » fournit néanmoins une information intéressante : en moyenne, la puissance de chaque roue diminue d'environ 270 W/an. Les valeurs correspondantes sont détaillées dans la 3^e colonne du tableau 2.
- un *fittage par un polynôme du second degré* (courbe bleue) qui représente assez exactement l'évolution réelle de $P(t)$: c'est lui qui « colle au mieux » avec les « points expérimentaux ». Les valeurs correspondantes sont détaillées dans la 4^e colonne du tableau 2.
- un *fittage exponentiel* (courbe jaune) dont les valeurs correspondantes sont détaillées dans la 5^e colonne du tableau 2. S'il ne représente pas lui non plus l'évolution réelle, il fournit des indications susceptibles de déduire des valeurs plausibles pour divers paramètres des roues, valeurs pouvant être « extraites » de celle de l'exposant $\sim -0,0175$ dont on connaît la composition analytique (cf. équation [2]) et la dimension [s^{-1}].

La composition est de la forme : $-C_0/J \cdot \omega_0 = [N \cdot m / kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}] = [kg \cdot m^2 \cdot s / s^2 \cdot kg \cdot m^2]$
 $C_0 = 37,8 \text{ kN.m}$ et $\omega_0 = 0,974 \text{ à } 1 \text{ rad/s}$ donc $J = 2,16 \text{ à } 2,217 \text{ Mkg.m}^2$ dont on déduit la masse des roues. Deux approches sont envisageables suivant la formulation de J retenue : si l'on retient $J = MR^2$ (approche « classique »), $M = 60 \text{ à } 61,6 \text{ tonnes}$; si l'on utilise $J = M'R^2/3$ (approche de *Gastebois*), $M' = 20 \text{ à } 20,5 \text{ tonnes}$. À priori, rien ne permet d'effectuer un choix si ce n'est que nous pouvons comparer les roues à celles de la Machine de *Dufrayer* qui sont deux fois plus large, dont il paraît logique d'admettre qu'elles seraient deux fois plus lourdes. La valeur M serait alors plausible. On pourrait également tenir compte de leurs compositions, les « roues de *Renkin Sualem* » principalement composées de bois, comportent moins de métal (fonte et fer). La comparaison des masses volumiques des matériaux concernés pourrait entraîner une réduction de la masse d'un facteur 3 à 4 ce qui rendrait la valeur M' plausible. En l'absence d'informations pertinentes, nous laisserons la question « ouverte » ... jusqu'à plus ample informé, d'autant que c'est la valeur de J qui sera utile ultérieurement.

Évolution temporelle de la vitesse de rotation des roues $\omega(t)$

La courbe bleue de la figure 2 illustre l'évolution de la vitesse de rotation calculée en appliquant l'équation [3] *. Les valeurs correspondantes fournies par *fittage par un polynôme du second degré*, sont détaillées dans la 7^e colonne du tableau 2.

Un *fittage linéaire* (courbe rouge, 6^e colonne du tableau 2) fournit une information intéressante : en moyenne, la vitesse de rotation de chaque roue diminue d'environ 136 $\mu\text{rad/s}$ par année, soit 0,017 rad/s en 125 ans.

Contrairement à ce que l'intuition suggérait, la variation de $\omega(t)$ est donc très faible, fort probablement quasiment imperceptible ce qui, réflexion faite, est moins curieux qu'il peut paraître puisque le paramètre déterminant, la *vitesse du courant*, n'a sans doute pas varié significativement au cours de la durée de fonctionnement de la Machine.

*) L'équation [3]¹⁹, de la forme $\omega' = [P(t)/J] \cdot \omega^{-1}$, non-linéaire, peut être ramenée à une équation linéaire en posant $u(t) = [\omega(t)]^2 : u' = 2P(t)/J$, qui a pour solution

$$u(t) = c^{te} + \frac{2}{J} \int P(t) \cdot dt$$

donc

$$[\omega(t)]^2 = c^{te} + \frac{2}{J} \int P(t) \cdot dt = c^{te} + [C(t)]_0^t = \omega_0^2 + \frac{2}{J} \cdot \left[\frac{P(t)}{\omega(t)} - C_0 \right]$$

car en $t = 0 : \omega_0^2 = c^{te} + \frac{2}{J} \cdot [C_0 - C_0]$

et

$$\omega^2 \simeq \omega_0^2 + \frac{2}{J\omega_0} [P(t) - P(0)]$$

puisque $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega$ où $\Delta\omega$ vaut au maximum 0,017 $\text{rad/s} = \omega_0/60$

On notera que les dimensions sont respectées.

Évolution temporelle des « pertes » $f_r(t)$

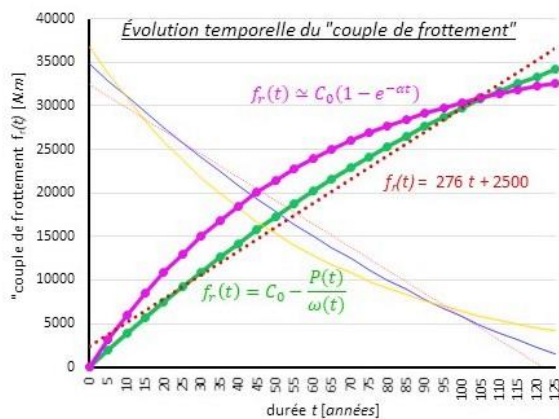


Figure 3

La courbe verte de la figure 3 illustre l'évolution du paramètre $f_r(t)$ calculée en appliquant l'équation [1]. Les valeurs correspondantes obtenues par *fittage* par un *polynôme du second degré*, sont détaillées dans la 9^e colonne du tableau 2.

Un *fittage linéaire* (courbe brune, 8^e colonne du tableau 2) fournit une information intéressante : en moyenne, le terme exprimant l'accroissement des pertes augmente d'environ 276 N.m/an . On notera que cette approche implique que $f_r(t)$ ne peut pas devenir supérieur au couple initial C_0 ce qui correspond à une puissance quasiment nulle.

Physiquement, cela signifie que les effets des « facteurs freinants », regroupés sous le couple $f_r(t)$, sont devenus égaux (ou supérieurs) aux couples moteur et résistant initiaux.

Nous avons également tenté un *fittage exponentiel* (courbe violette, 10^e colonne du tableau 2) en exploitant les informations obtenues précédemment ** : $f_r(t) \simeq C_0(1 - e^{-\alpha t})$ [4]

À titre de comparaison, les courbes montrant l'évolution de la puissance $P(t)$ sont représentées en filigrane.

***) On obtient l'équation [4] en utilisant les expressions exponentielles $P(t) = ae^{-\alpha t}$ et $\omega(t) = be^{-\beta t}$

$$\frac{P(t)}{\omega(t)} = \frac{a}{b} e^{(\beta-\alpha)t} \text{ où } \frac{a}{b} = \frac{P(0)}{\omega_0} = C_0$$

$$\text{donc [1]} = f_r(t) = C_0(1 - e^{(\beta-\alpha)t}) \simeq C_0(1 - e^{-\alpha t})$$

un *fittage exponentiel* donne $\omega(t) = 0,9735 e^{-7E-04 t}$ et $\beta (= 0,0004) \ll \alpha (= 0,0175) = C_0 / J \cdot \omega_0 = [s^{-1}]$

Pertes de charge

La forme, les dimensions et la rugosité des canalisations, la vitesse d'écoulement et la viscosité du liquide, mais pas la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide, engendrent des pertes d'énergie spécifiques appelées *pertes de charge* lorsqu'on considère un fluide réel.

La différence de pression entre deux points d'un circuit hydraulique a pour origine :

- les frottements du fluide sur les parois interne de la tuyauterie : on les appelle *pertes de charge régulières ou systématiques*,
- la résistance à l'écoulement provoquée par les obstacles ou les changements au long du parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc ...) : ce sont les *pertes de charge singulières*.

Les représentations de l'installation montrant des conduites relativement rectilignes et l'absence de documentation précise entraînent à ne considérer que les premières.

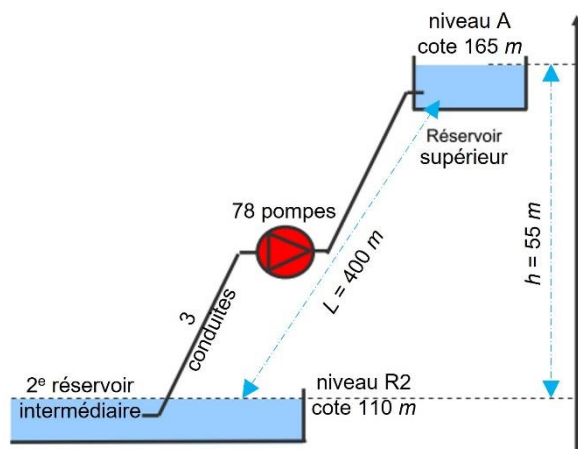
Cette perte d'énergie doit être compensée afin de permettre au liquide de se déplacer. On l'exprime couramment sous la forme d'une pression ($\Delta p_{rég}$ en Pa : équation [5]) ou d'une hauteur de colonne de fluide ($\Delta H_{rég}$ en m : équation [6]) dans l'équation de Bernoulli généralisée, bien qu'elle soit en fait représentative d'une dissipation d'énergie^{20,21}.

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p_{rég} \quad [5]$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{rég} \quad [6]$$

La puissance dissipée par les frottements visqueux s'écrit : $P_{rég} = \Delta p_{rég} \cdot Q_V$ [7] Q_V étant le débit volumique et

$$\Delta p_{rég} = \lambda \frac{\rho L}{2d} v^2 = \lambda k v^2 \quad [8] ; \quad Q_V = S \cdot v = \frac{\pi d^2}{4} v$$



λ est le coefficient de perte de charge, c'est un nombre *sans dimension*,
 ρ , la masse volumique de l'eau (= 997 kg/m³),
 L , la longueur des tuyauteries (= 1200 m ou 3 tronçons de 400 m, chaque tronçon reliant deux niveaux),
 d , le diamètre des tuyauteries (estimé à 4 m à partir de l'examen des représentations de la Machine : 3 conduites ont, apparemment la largeur d'une roue),
 S , la section d'une conduite
et v la vitesse de l'eau dans les conduites.

Pour simplifier les calculs, nous supposons que toutes les conduites sont identiques même si ce n'est pas réellement le cas, et qu'elles s'étendent d'une traite de la Seine au haut de Marly ($L = 1200$ m ; $h = 165$ m) ou en trois tronçons ($L = 400$ m ; $h = 55$ m) selon les conditions considérées. Ces « approximations » ne dénaturent pas les traitements effectués.

Aspect spatial

Dans cette approche, nous allons tenter d'exprimer la perte de charge éventuelle produite à un moment donné par les frottements (au sens général) engendrés par l'eau poussée par les pompes aspirantes – foulantes dans une colonne.

Pour simplifier tout en respectant au mieux la réalité, nous considérerons l'installation en trois niveaux permettant d'amener les eaux de la Seine 165 m plus haut, au réservoir de la Tour du Levant, d'où elles sont dirigées vers Versailles via l'Aqueduc de Louveciennes, les réservoirs de Marly et Louveciennes et un « jeu de tuyauteries » utilisant simplement les effets de la pesanteur.

Le niveau de la Seine est choisi comme cote 0, niveau S. Les niveaux sont supposés séparés l'un de l'autre par une hauteur h et reliés par des conduites de longueur L : cinq conduites et 64 pompes entre

la Seine et le premier réservoir intermédiaire (niveau R1, cote 55 m), trois conduites et 79 pompes entre le premier et le deuxième réservoir intermédiaire (niveau R2, cote 110 m), et trois conduites et 78 pompes entre le niveau R2 et le réservoir supérieur (niveau A, cote 165 m). Les tronçons de conduites sont supposés avoir la même longueur L et le même diamètre d . Les débits connus sont mesurés au sommet, au niveau A. Les pompes sont supposées identiques. Il est évident que les conditions précédentes ne sont pas « réelles », elles permettront néanmoins de construire une *représentation « réaliste » du fonctionnement de la Machine*.

Nous analyserons d'abord le tronçon « R2-A », bien documenté : $h = 55 \text{ m}$, $L = 400 \text{ m}$, $p_{R2} = p_A = p_{atm}$ (surface libre des réservoirs), $\Delta p_{R2-A} = \rho g h$ (entre les extrémités de chaque colonne), $v_{R2} = 0$ et $v_A = Q_{VA}/S$, $Q_{VA} = 2000, 1666,66$ ou $1000 \text{ m}^3/\text{jour}$ selon les conditions initiales retenues, $S = 4 / \pi d^2$.

Dans chaque colonne, la vitesse d'écoulement est $v = 4 Q_{VA} / \pi \cdot d^2$, et le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d}{(\mu/\rho)}$$

ν étant la viscosité cinématique [m^2/s] et μ la viscosité dynamique [$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s}$]

$$\nu_{H2O, 20^\circ} = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ et } \eta_{H2O} = 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Le nombre de Reynolds [sans dimension] ^{22,23} caractérise la nature de l'écoulement :

- $Re < 2000$: régime laminaire : $\lambda = 64/Re$ (équation de *Poiseuille*)

- $2000 < Re < 2500$: régime transitoire

- $2500 < Re < 10^5$: régime turbulent « lisse » : $\lambda = 0,316 Re^{-0,25}$ (équation de *Blasius*)

- $Re > 10^5$: régime turbulent « rugueux » : cf. infra

La relation de *Hagen-Poiseuille* $\Delta p_{rég} = Q_V \cdot [128 \mu L / \pi d^4]$, η étant la viscosité du fluide qui se mesure en *poiseuille(s)* [$Pl = \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$], n'est pas applicable puisque les valeurs de Re trouvées situent les écoulements considérés en régime turbulent. Il faut donc recourir à une autre formulation, adaptée à ces régimes. Diverses approches existent selon les paramètres intervenants, notamment la *rugosité interne* des parois des canalisations : *von Karman-Prandtl*, *Blasius* (écoulement turbulent lisse), La corrélation de *Colebrook* est actuellement considérée comme traduisant le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent rugueux :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,71 d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

Une variante récente, due à *Haaland*, propose :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,71 d} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right)$$

ε étant le facteur de rugosité : $0,4 < \varepsilon < 0,6 \text{ mm}$ pour la fonte *. ε augmente au cours du temps, le précédent peut par exemple devenir supérieur à 1 après quelques dizaines d'années.

Les formes implicites des conjectures énoncées ci-avant, nécessitent un calcul par approximations successives d'où le recours en pratique, à des représentations graphiques, à des abaques (diagrammes de *Moody*) ^{22,23}.

Les résultats correspondant aux données et conditions précédentes sont résumés dans le tableau 3.

Q_v tot	Q_{VA} /colonne	Q_v tot	Q_{VA} /colonne	L [m]	d [m]	h [m]	v [10^{-3} m/s]	Re	λ^* [10^{-3}]	$\Delta p_{rég}$ [10^{-3} Pa]	P_u [kW]
[m^3/jour]		[m^3/s]									
6000	2000	0,069	0,023	400	4	55	1,842	7317	34,17	5,78	12,45
5000	1666,66	0,058	0,019				1,535	6097,5	35,76	4,20	10,38
3000	1000	0,035	0,0115				0,921	3658,5	40,63	1,72	6,23

* *Blasius*

Tableau 3

On constate que les pertes de charge par conduite sont très faibles, donnant lieu à des consommations en puissance $P_u = Q_{VA} \cdot (\rho g h + \Delta p_{rég}) \approx Q_{VA} \cdot \rho g h$. Pour l'étage, les puissances respectivement requises en fonction du débit considéré, 6000, 5000 ou 3000 m^3/j , sont : 12,45, 10,37 et 6,23 kW. Les

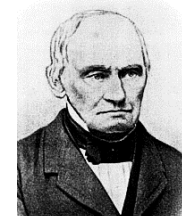
trois étages étant supposés intervenir de la même manière, les puissances globales correspondantes seront : 112, 93,4 et 56 kW. On notera que ces valeurs sont celles trouvées lors de l'examen du système hydraulique.

Ne disposant pas d'information(s) pertinente(s) relative(s) aux caractéristiques ni au fonctionnement des pompes, nous avons supposé que leur rendement est proche du maximum ($\leq 100\%$), du moins à l'époque de la mise en fonctionnement de la Machine. Vu les résultats précédents, il est d'ailleurs fort probable que la perte progressive de puissance est largement consécutive à la dégradation des pompes, notamment à la diminution de leur rendement.

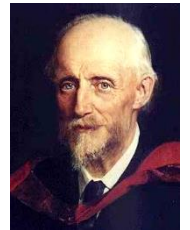
- Poiseuille Jean-Léonard-Marie (1797-1869), physicien français
- Hagen Gotthilf (1797-1884), ingénieur hydraulicien prussien
- Reynold Osborne (1842-1912), physicien irlandais
- Prandtl Ludwig (1875-1953), ingénieur allemand en aéronautique
- Moody Lewis Ferry (1880-1953), ingénieur américain
- von Karman Théodore (1881-1963), ingénieur américano-hongrois
- Blasius Heinrich (1883-1970), ingénieur hydraulicien allemand
- Colebrook Cyril Frank (1910-1997), physicien britannique
- Haaland S.E. ingénieur norvégien, *Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow*, J. Fluids Eng. Mar 1983, 105(1): 89-90



Jean-Marie Poiseuille



Gotthilf Hagen



Osborne Reynolds

Il apparaît donc que les pertes de charges ne sont pas la cause (principale) des diminutions de performance de la Machine mises en évidence précédemment.

Aspect temporel

Les informations collectées au paragraphe précédent concernent principalement les conditions initiales ou directement déduites : débit(s) = 6000 m³/jour, ce qui correspond au but initial : « vérifier la plausibilité des informations disponibles relatives au fonctionnement et performances de la Machine », informations disponibles dans des documents de l'époque de sa construction et décrivant son évolution au cours de ses 125 années d'existence. Les informations analogues sont aisément calculables pour les dates intermédiaires entre la mise en activité et l'arrêt via les données disponibles via les tableaux et graphes illustrant les évolutions temporelles de plusieurs paramètres. Pour compléter, sans toutefois prétendre être exhaustif, nous ajouterons quelques résultats relatifs à des paramètres « significatifs » : cf. tableau 4 et figures 4 et 5.

Durée t [années]	Débit total Q _v [m ³ /j]	Vitesse d'écoulement [10 ⁻³ m/s]*	Rendement η(t) = P(t)/P(0) [%]	φ(t) = f _r (t)/f _r (0) [%]	η vs φ
0	6000	1,842	100	0,03	100,03
5	5000	1,535	83,33	5,69	89,03
50	3000	0,921	50	50,57	100,57
70	2000	0,614	33,33	66,91	100,24
110	650	0,199	10,83	92,72	103,55
125	240	0,074	4	100	104

*) comme signalé précédemment, la vitesse d'écoulement est celle mesurée dans chaque conduite

Tableau 4

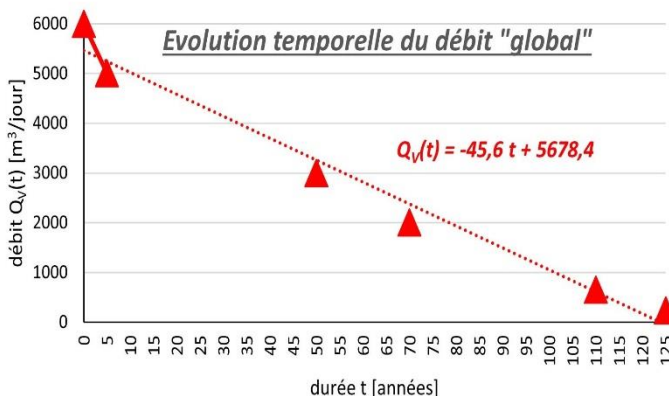


Figure 4

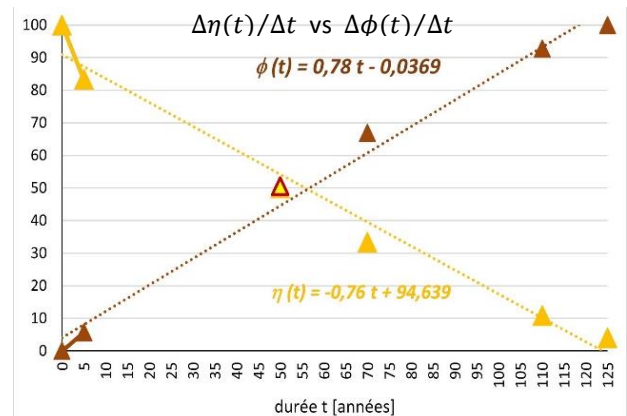
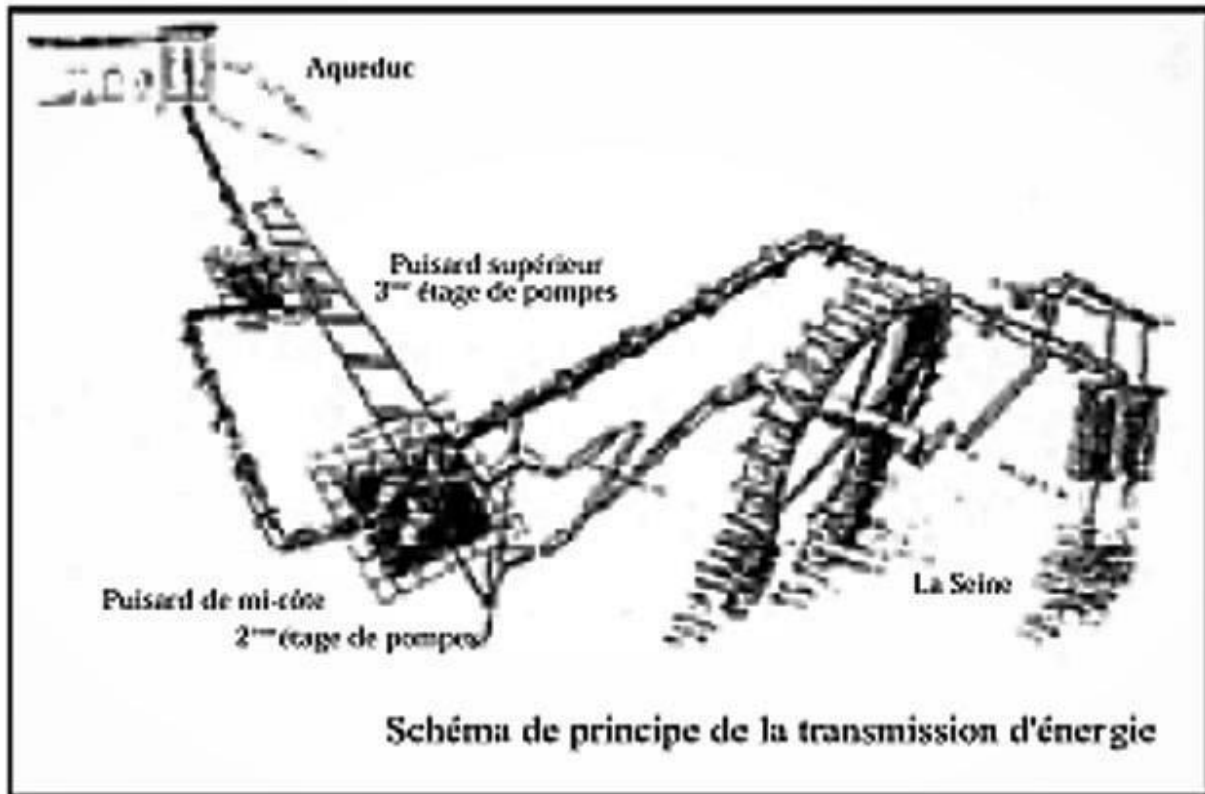


Figure 5

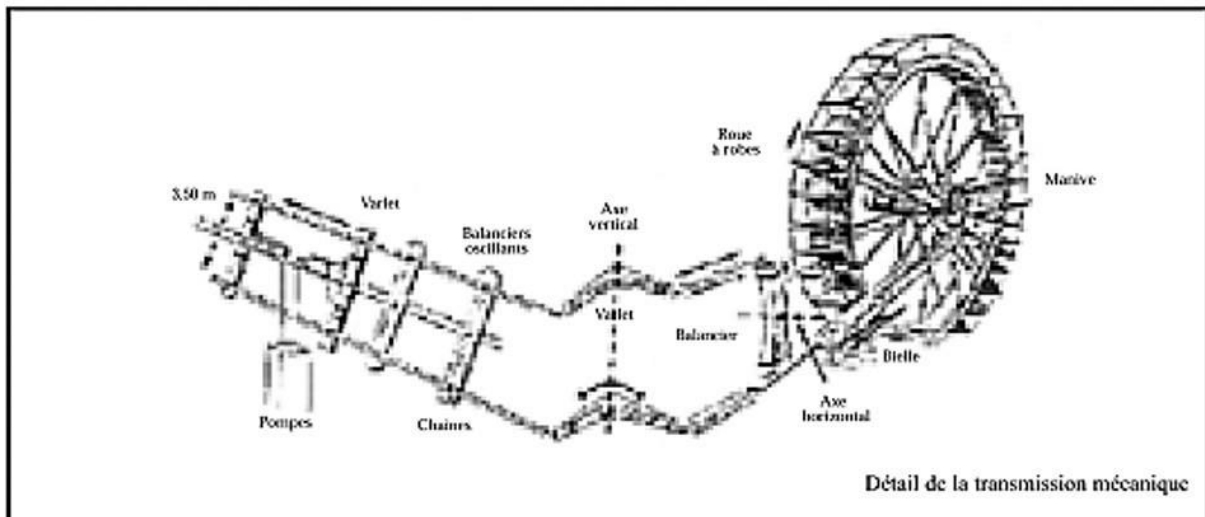
Conclusion

On constate que la « vitesse » de décroissance temporelle du rendement $\Delta\eta(t)/\Delta t$ est presque exactement « symétrique » de celle de l'accroissement temporelle du « facteur freinant relatif » $\Delta\phi(t)/\Delta t$, résultat auquel on pouvait logiquement s'attendre . . . aux approximations inhérentes au manque de précision des données disponibles :

$$\left| \frac{\Delta\eta(t)}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\Delta\phi(t)}{\Delta t} \right| \approx 0,775 \text{ [%/an]}$$



Documents : Les Carnets du Musée des Arts et Métiers ²⁴



Références

1. Bernard Forest de Bélidor - Commissaire Provincial d'Artillerie, , *Architecture Hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie, Tome second, Livre troisième,*

- Où l'on enseigne la théorie des pompes, la manière de les mouvoir, et la description de plusieurs belles machines pour élever l'eau, Chapitre IV : De la théorie des pompes où l'on décrit plusieurs machines pour élever l'eau par le moyen des pompes, Description de la Machine de Marly, pp. 195-205 ; à Paris rue S. Jacques, chez Charles-Antoine Jombert, Librairie de l'Artillerie et du Génie, à l'Image Notre-Dame - M.DCC.XXXIX (1739) avec approbation et privilège du Roy.
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Bernard_Forest_de_B%C3%A9lidor
 - <https://www.marlymachine.org/belidor.pdf>
2. Jean-Victor Poncelet, *Mémoire sur les roues hydrauliques à aubes courbes, mues par-dessous, suivi d'Expériences sur les effets mécaniques de ces roues*, C. Lamor, imprimeur de la Sociétés des Lettres, Sciences et Arts, et d'Agriculture de Metz – Nouvelle édition revue, corrigée et augmentée d'un second mémoire, Librairie Thiel, Metz (1827), 146 pages et 2 planches; <http://dbhsarl.eu/temp/hydroroues/Poncelet.htm>
https://www.moulinsdefrance.org/wp-content/uploads/2018/09/M%C3%A9moire_sur_les_roues_hydrauliques_Poncelet_Jean-Victor.pdf
- *Mémoire sur les roues hydrauliques verticales, à aubes courbes, mues par-dessous* (éd. 1825), BNF – Hachette Livre (paru en 2019) – conservation patrimoniale des ouvrages de la littérature Française mise en place par la Bibliothèque Nationale de France
<https://www.fr.fnac.be/a13714800/Jean-Victor-Poncelet-Memoire-sur-les-roues-hydrauliques-verticales-a-aubes-courbes-mues-par-dessous>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Victor_Poncelet
 3. François Folie, *Note sur la théorie de la roue Poncelet*, Bulletin de l'Académie des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, 2^e série, tome 26, 11 (1868), pp.453-468 ; <http://hdl.handle.net/2268/167116>
[https://www.bestor.be/wiki/index.php/Folie,_Fran%C3%A7ois-Jacques-Philippe_\(1833-1905\)](https://www.bestor.be/wiki/index.php/Folie,_Fran%C3%A7ois-Jacques-Philippe_(1833-1905))
 4. - Gerald Müller, Sally Denchfield, Reinhard Marth, Bob Shelmerdine, *Stream wheels for applications in shallow and deep water*, 32nd IAHR Conference 2007, Venice, Italy. 30 Jun - 05 Jul 2007,
 5. <http://www.iahr2007.corila.it/...lpaper.php>
- *Les roues à eau classiques et la théorie de Müller*,
<https://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0708/beiere/3/html/bi/3/ch2.html>
- Gerald Müller and Christian Wolter, *The breastshot waterwheel : design and model tests*, Proceedings of the ICE (Institution of Civil Engineers), Engineering Sustainability 157, Issue ES – 1 3806 (2004), pages 1-9 ;
https://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0708/beiere/3/html/bi/3/fichiers/Muller_exp.pdf
- Gerald Müller (Associate Professor within Engineering and Physical Sciences at the University of Southampton), *Water wheels as a power source*, Renewable Energy, 9 pages
https://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0708/beiere/3/html/bi/3/fichiers/Muller_histo.pdf
 6. Etienne Schloune, V. Hanus Pierrard, *Etude de faisabilité technique : conception d'un nouveau type d'hydrolenne*, Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°30 (2016), pp.37-51
<http://www.isilf.be/Articles/ISILF16p37pierrard.pdf>
 7. - Frédéric Élie, *À la découverte d'anciennes technologies : Pompe aspirante-foulante*, Accueil FE (mai 2009), 8 pages ; [pompes aspirantes foulantes.pdf](#)
- *Acheminer l'eau à Versailles : le défi de la Machine de Marly*, Jeux et activités - Défi expert : Construire la pompe de Marly,
http://ressources.chateauversailles.fr/IMG/pdf/ressource-pedagogique_jeux-defi_machine_de_marly-fiche_prof.pdf
- HACH (Hydrologie, Hydrodynamique appliquée et constructions hydrauliques), *Pompes et turbines, éléments de théorie, Cours de Compléments d'hydraulique* – 3^e Bac Architectes & Constructions, Faculté des Sciences Appliquées – Uliege
<http://www.hach.ulg.ac.be/cms/en/system/files/2%20-%20Pompes%20et%20turbines11-12.pdf> – 51 pages
 8. - https://fr.wikipedia.org/wiki/Roue_%C3%A0_aubes
- *La roue hydraulique Sagebien, roue hydraulique des basses chutes*, publié par FDMF (Fédération des Moulins de France), 1^{er} mai 2002, <https://fdmf.fr/la-roue-hydraulique-sagebien-roue-hydraulique-des-basses-chutes/>
- *Les roues hydrauliques*, janvier 2018, https://nanopdf.com/download/les-roues-hydrauliques_pdf
- <http://moulindewanlin.be/la-centrale/les-differents-types-de-roues-de-moulin/>
- *La roue hydraulique*, ASME (Association de Sauvegarde des Moulins à Eau de Loire-et-Cher et départements limitrophes, n°13 (2013), pp.2-35,
https://www.moulinsaeau-41.org/wp-content/uploads/Bulletins/ASME_BULLETIN_13.pdf
 9. Accueil / mécanique / 507. *Roues en dessous. Roues Poncelet. Données usuelles d'établissement*, octobre 2016 ; <http://qcmtest.fr/507-roues-dessous>

10. - Le Château de Versailles : Le système hydraulique – chronologie des travaux d’adduction :
<http://ressources.chateauversailles.fr › IMG › pdf>
 - *La Machine de Marly et l’Aqueduc de Louveciennes*, Bertrand – French Baroudeur (16/09/2019),
<http://french-baroudeur.com/la-machine-de-marly-et-laqueduc-de-louveciennes/>
11. - <https://studylibfr.com/doc/5169165/exercice-2--la-machine-de-marly--energies>
 - <https://www.ilephysique.net/sujet-la-machine-de-marly-258068.html>
 - <https://www.ilephysique.net/sujet-la-machine-de-marly-258068-2.html>
 - <https://www.ilephysique.net/sujet-la-machine-de-marly-258068-3.html>
 - *Fontaines du château de Versailles* : <https://assets.ils.fr › pages › pct-lb2-1-fontainesversailles › pdf>
12. http://www.peniche.com/inondations/1cp_notes.htm
13. Les débuts de l’hydroélectricité, 6 pages,
<http://www.andrey.li/roues%20hydrauliques/les%20debuts%20de%20l%20hydroelectricite.pdf>
14. Gilbert Gastebois, *Roues à aubes au fil de l’eau*, http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/moulin/theorie_moulin.pdf
15. - Antoine Hautot, *Physique générale – 1^{re} partie : Mécanique physique*, éditions Desoer – Liège (1949), pp.212-215
 - Cellule bilingue – traducteur Dr Bounseng Bounthong , *Physique – chapitre 1 : Mouvement de rotation d’un solide*, (2017-18), 15 pages;
<https://lewebpedagogique.com/classesbilinguesljb/files/2018/06/chapitre1-Le%C3%A7on1-2.pdf>
16. HACH (Hydrologie, Hydrodynamique appliquée et constructions hydrauliques), *Pompes et turbines, éléments de théorie, Cours de Compléments d’hydraulique – 3^e Bac Architectes & Constructions*, Faculté des Sciences Appliquées – ULiege,
<http://www.hach.ulg.ac.be/cms/en/system/files/2%20-%20Pompes%20et%20turbines11-12.pdf> – 51 pages
17. Jacques Berty, Pierre Marchand et André Oustry, *Problèmes de physique – capes 1960-74*, Exercices Vuibert (1975), pp.251-258, 359-366
<https://www.leslibraires.fr/livre/1282648-problemes-de-physique-problemes-du-c-a-p-e-s--jacques-berty-pierre-marchand-andre-oustry-vuibert>
18. *La Machine de Marly et l’Aqueduc de Louveciennes*, Bertrand – French Baroudeur (16/09/2019),
<http://french-baroudeur.com/la-machine-de-marly-et-laqueduc-de-louveciennes/>
19. André Angot, *Compléments de mathématiques à l’usage des ingénieurs*, Masson et Cie, 6^e éd. (1972), pp.294-301.
20. - Jacques Franeau, *Dynamique des fluides*, in *Physique*, tome I, Lielens éditeur, 3^e éd. (1978), pp.146-151
 - Robert Debot, *Physique générale : Optique géométrique et Mécanique*, tome 1, éd. ULg (1968), pp. 227-233
21. <http://www.estusmba.ac.ma/coursenligne/GTE%201%20S2%20M5%201%20MdF%20COURS%20S24%20Ouazza ni.pdf>
 - https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/pertes_de_charge.pdf
 - <http://www.vft47.fr/medias/files/pertes-de-charge.pdf>
 - <https://philippe.bouillard.web.ulb.be/cours/III-04-fluidesvisqueux.pdf>
22. - Tafat Bouzid Anis, *Synthèse des formules de calcul des pertes de charges et analyse de l’incertitude sur le choix de la rugosité*, Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure d’Hydraulique – Arbaoui Abdellah, République Algérienne démocratique et populaire (2015) ;
https://library.ensh.dz/images/site_lamine/pdf/these_master/2015/6-0002-15.pdf
 - Riadh Ben Hamouda, *Notions de Mécanique des Fluides, Cours et exercices corrigés*, Centre de Publications universitaires (2008), pp.52-119 ;
https://www.academia.edu/8814591/NOTIONS_DE_MECANIQUE_DES_FLUIDES
23. - <http://www.vft47.fr/medias/files/pertes-de-charge.pdf>
 - <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Analogie-composant-elec-hydro-RC.xml>
 - <https://www.suezwaterhandbook.fr/formules-et-outils/formulaire/hydraulique/pertes-de-charge-par-frottement-dans-les-tuyaux-pour-l-eau>
24. La Machine de Marly, Collections du Musée des Arts et Métiers (<http://www.arts-et-metiers.net>),
<https://www.arts-et-metiers.net/musee/modele-machine-de-marly>

ps. Nous invitons celles et ceux qui souhaitent se faire une idée plus complète de la complexité des dispositifs développés à Marly, et par la même occasion de l’imagination et de l’ingéniosité des concepteurs / réalisateurs, à consulter quelques vidéos particulièrement bien documentées et réalistes : *le spectateur est à Marly*.