

ANDRÉ DUCLUZAUX

L'ÉLECTRICITÉ DÉCOUVREURS ET INVENTEURS

Tome II - Générer l'électricité



André Ducluzaux

L'électricité

Découvreurs et Inventeurs

Cent aventures de
physiciens, autodidactes,
ingénieurs, techniciens

Tome II **Générer l'électricité**

LES ÉDITIONS DU NET
22, rue Édouard Nieuport 92150 Suresnes

Générer l'électricité

- Produire l'électricité

1 - Générateurs électrochimiques

Piles hydroélectriques, utilisations. Pile à gaz. Accumulateur
Stocker l'énergie électrique, en direct, en indirect.

2 - Générateurs statiques

Pile thermoélectrique. Générateur photo-électrique.
Générateur piézo-électrique.

3 - Générateurs électromécaniques

La machine de Pixii. Machines de Clarke et autres. Deux applications
de l'électricité. Générateurs plus puissants. Trois perfectionnements,
autoexcitation. Machine Gramme. Antériorités. Réversibilité. Machine
Siemens. Dynamos en alternatif. Épilogue.

4 - Bobine d'induction- Ruhmkorff

Bobine de Masson. Bobine de Ruhmkorff. Antériorités. Applications

5 - Quelles énergies pour produire l'électricité

Sources d'énergie. Centrales thermiques à flamme. Centrales
thermiques nucléaires. Forces naturelles, hydraulique, éolienne,
biomasse, géothermique, solaire, des mers. Coûts.
Nouvelles conversions. Production mondiale.

6 - Historique – Sources d'énergies pour l'électricité en France

La croissance 1890- 1945. L'après guerre. D'autres sources d'énergies.
Débuts du nucléaire. L'électricité nationale devient européenne.
Les énergies renouvelables.

Quelques unes des 140 pages.....

Produire l'électricité

Les pionniers de l'électricité, après avoir découvert les étranges propriétés de ce nouveau fluide se sont préoccupé de le produire plus efficacement, et en plus grande quantité qu'avec la pile de Volta. Des applications pratiques se révélaient progressivement.

L'homme a toujours satisfait ses besoins alimentaires, énergétiques ou autres en les empruntant à la nature, ou aux autres espèces vivantes, mais l'électricité n'existe quasiment pas à l'état naturel :

– Celle de la foudre, qui même si elle génère des courants très intenses, ils ne durent qu'une fraction de seconde. La quantité d'énergie est relativement faible et inexploitable.

– Les importants courants telluriques du noyau terrestre engendrent ce discret champ magnétique orientant nos boussoles. Ampère puis Faraday, Wollaston et Delezenne l'ont capté, pour ne produire que des milliampères.

– Les espèces animales, dont l'homme, transmettent bien l'information de leur cerveau à leurs muscles par de très faibles signaux électriques, mais ils sont générés à partir d'énergie chimique, comme l'arme des poissons électriques.

Mais alors, **comment produire l'électricité artificiellement ?**

Les physiciens réalisèrent progressivement que l'électricité était une forme d'énergie, et qu'elle ne pouvait donc pas être créée, mais résulter de la transformation d'une autre énergie, elle-même issue d'une forme naturelle. C'était la conséquence du principe de la conservation de l'énergie qu'ils découvrirent dans la décennie 1840 (I-6).

Le problème était double : d'une part de quelle réserve d'énergie naturelle l'extraire, ensuite par quel moyen ou transformation ?

À la première question, la réponse est apparemment simple, les énergies naturelles de l'Univers étant généralement connues. La difficulté étant le choix entre leurs différentes formes disponibles. Ce choix est complexe, surtout à notre époque où plusieurs formes se raréfient, il fait l'objet du chapitre 5 suivant.

Quant aux modes de transformation, ils se divisent en :

– **électrochimique**, origine de la découverte de l'électricité avec la pile de Volta, puis ses multiples transformations souvent réversibles.

– **statique**, groupe de transformations générant directement l'électricité à partir de la chaleur, la lumière, la pression ou autre source.

– **électromécanique**, produisant près de 98% de notre énergie électrique au moyen du phénomène d'induction découvert par Faraday, permettant de transformer l'énergie mécanique en électrique. Cette énergie mécanique provenant pour 80% de la chaleur, résultant elle-même d'autres transformations, soit chimique de combustion, soit la fission atomique.



Dynamo Gramme, type supérieur – 1886 – Musée Ampère

3 – Générateurs électromécaniques

98 % de l'énergie électrique est aujourd'hui générée dans le monde à partir d'énergie mécanique, obtenue elle-même à partir de l'énergie thermique pour 80%. Cette voie royale allait s'ouvrir dès la découverte de l'induction par Faraday fin 1831. La toute première machine inventée un an plus tard, esquissait déjà le principe de l'alternateur de nos centrales modernes.

Mais son grave défaut, ne pas produire un courant continu semblable à celui des piles, engagea les électriciens dans des améliorations incertaines qui nécessitèrent des décennies pour aboutir à des machines industrielles, mais à courant continu. Ce furent d'abord quarante années d'hésitations, puis la mise au point en dix ans des machines Gramme puis Siemens, suivies de beaucoup d'autres.

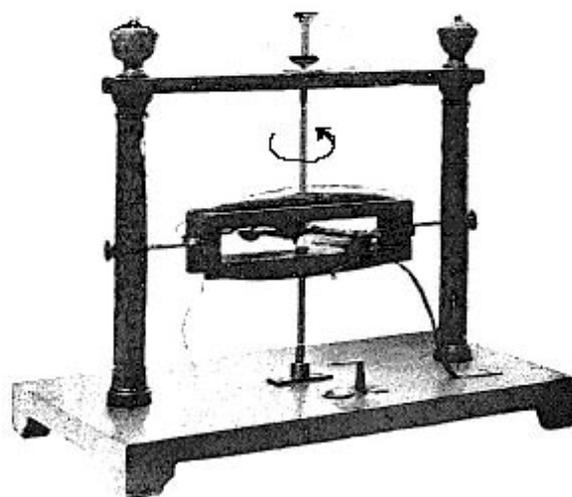
Quant à l'alternateur, la machine qui fabrique 97% de notre électricité, après une fugitive maquette disparue de Pixii, aucun inventeur n'en a jamais réclamé la paternité. Il est apparu comme un avatar pour une utilisation marginale, l'éclairage par arc, d'abord celui des phares. Mais on n'imaginait pas pendant un demi-siècle que l'électricité pouvait être autre chose que du courant continu, s'écoulant comme l'eau des rivières

La machine de Pixii

Retraçons les six étapes de la conception de cette première génératrice à induction, d'une importance historique et technique décisive. Ce fut la première transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, après le disque expérimental de Faraday (I-5). Le plus surprenant était que cette première machine avait déjà adopté exactement le principe qu'utilisent les alternateurs actuels.

1) Au début de 1832, Ampère voulait reprendre des expériences faites dix ans plus tôt à Genève chez de La Rive. Il demanda à Hippolyte Pixii, constructeur d'instruments de physique à Paris, de lui réaliser un appareil de sa conception, basé sur le principe de l'induction que Faraday venait de découvrir, capable de produire un courant à partir d'une énergie mécanique, la force humaine pour débiter.

Sa description a été retrouvée par Uri Zelbstein (1) et dans le livre de Sartiaux de 1903. Cette première machine magnéto-électrique à courant continu (a), avait un induit fixe, une bobine rectangulaire, sans fer. L'inducteur, un bras horizontal, pivotant sur un axe vertical, portait à chaque extrémité quatre aimants concentriques. Au-dessous, des roulettes établissaient tous les demi-tours un contact par une lame élastique fixe avec une sortie de l'induit, l'autre sortie étant libre. On obtenait ainsi un courant redressé.

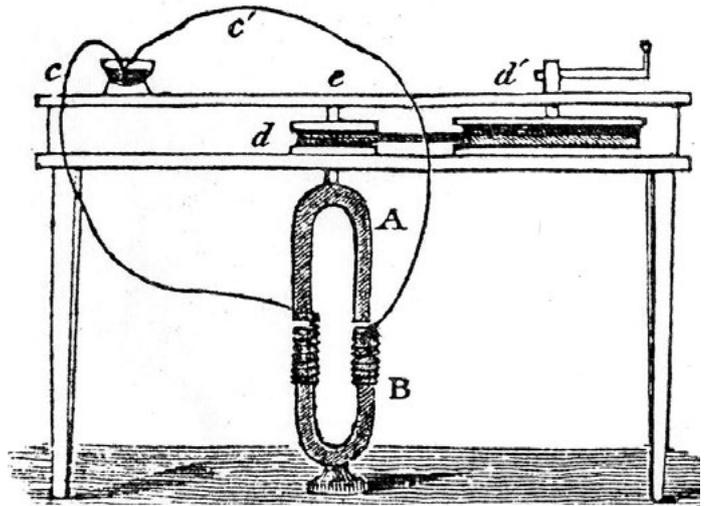


a Première génératrice de courant continu
Machine à induction d'Ampère-Pixii -1832

Cette étrange machine n'a du être construit qu'à un seul exemplaire ; elle figurait lors de la rétrospective sur l'électricité de l'exposition de 1900 à Paris, à côté d'une autre machine de Pixii plus tardive de quelques mois. Appartenant à la collection du Collège de France, elle s'est « perdue » depuis, il n'en reste que la mauvaise photo ci-dessus, à moins qu'un lecteur curieux ne la retrouve dans un grenier parisien et confie cette pièce historique au musée Ampère ou au CNAM.

2) Faraday recevait le 26 juillet 1832 une lettre d'un inconnu, juste signée P.M., décrivant une machine basée sur l'induction, ayant servi à décomposer l'eau, sans croquis. Un disque en bois rotatif portait six aimants, il tournait devant les armatures de six bobines induites à noyau de fer. Faraday était le type de savant uniquement motivé par la passion de comprendre ; l'objectif atteint, les applications pratiques de ses découvertes ne l'intéressaient plus. Aussi, il renvoya la lettre d'auteur inconnu au Philosophical Magazine qui la publia le 2 août. Elle a peut-être inspiré des machines ultérieures, mais pas celle de Pixii.

3) Au cours de cet été 1832, Pixii réalise sur la suggestion d'Ampère un autre prototype dont le croquis (b) est dû à l'américain Saxton qui l'avait vu chez Pixii (2). Un aimant entraîné par la manivelle tourne devant une armature formée de deux bobines sur un noyau de fer. Le courant est transmis par des fils dont l'un trempe dans la coupelle de mercure, l'autre à peine au-dessus du mercure.

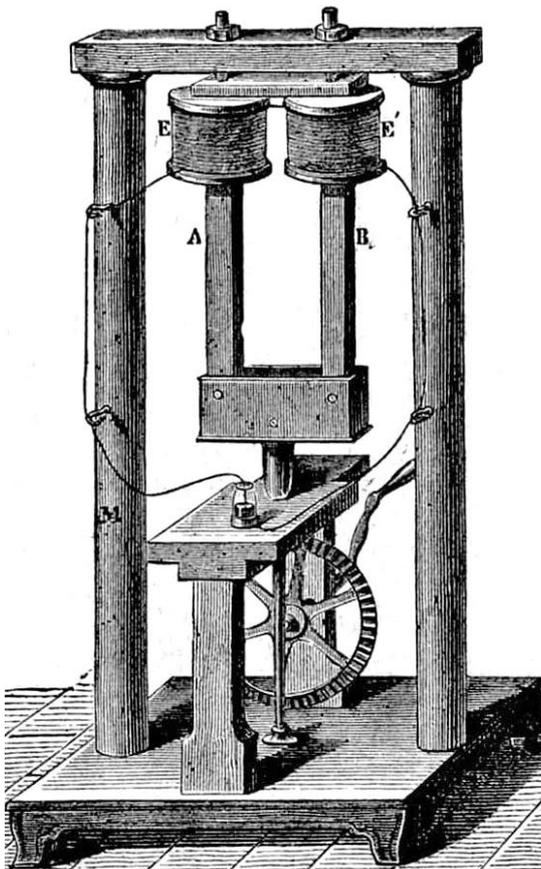


Pixii magneto generator, without commutator.
b *American Journal of Science*, April 1833, vol. 24.

Les vibrations de la table, quand tourne la machine, provoquent des petites étincelles au contact rompu fugitivement entre le fil et le mercure. Moyen simple pour détecter la circulation d'un courant probablement « *alternativement renversé* », non mesurable avec le galvanomètre, à courant continu.

4) Mais ce n'était qu'une maquette provisoire, rapidement transformée en une véritable machine de laboratoire (c). Cette machine n'a pas du être construite à plus de deux ou trois exemplaires, puisque remplacée rapidement par la suivante. Aucun n'est parvenu jusqu'à nous, seule sa gravure figure dans quelques anciens livres. C'est cette machine qui a été présentée par Hachette à l'Académie le 3 septembre 1832. Elle donnait des commotions, et en la reliant à un voltamètre, le courant permettait l'électrolyse de l'eau, mais comme il était alternativement renversé, le gaz obtenu était un mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène.

Que faire alors d'une machine incapable de produire un vrai courant, circulant toujours dans le même sens comme celui des piles, comme la logique et le bon sens le voulait ?



c Machine magnéto-électrique de Pixii à courant alternatif

Pourtant, si un lecteur en retrouvait une aujourd'hui dans un placard d'université, qu'il la confie à un musée, ce serait une pièce majeure du puzzle, le premier alternateur au monde.

4 bis) Arrêt sur images

Inutile d'être diplômé d'une grande école d'électricité pour constater l'étonnante similitude, de principe s'entend, entre :

– D'une part la dynamo de vélo du XX^e siècle (d), en réalité un alternateur, des bobines à noyau de fer où se développe le courant dans un induit, tournant entre des aimants inducteurs.

– D'autre part la machine de Pixii (c), où inversement les deux pôles d'un aimant en fer à cheval tournent devant deux bobines fixes à noyau de fer commun.

Quant à la photo (e) il suffit d'une forte lunette rétrécissante et d'un bon effort d'imagination pour retrouver exactement le principe de Pixii : un long électro-aimant cylindrique, le rotor, est introduit dans l'axe du tunnel ou travaille l'homme au casque jaune ; ce rotor inducteur tourne en face des 2x3 bobines (triphasées) insérées dans le stator, épais et long tuyau en acier de cet alternateur moderne Siemens.

Ainsi, les grands alternateurs de nos centrales sont conçus, avec quelques différences technologiques et dimensionnelles, sur le même principe de base que la toute première machine de 1832, transformant pour la première fois de l'énergie mécanique en énergie électrique.

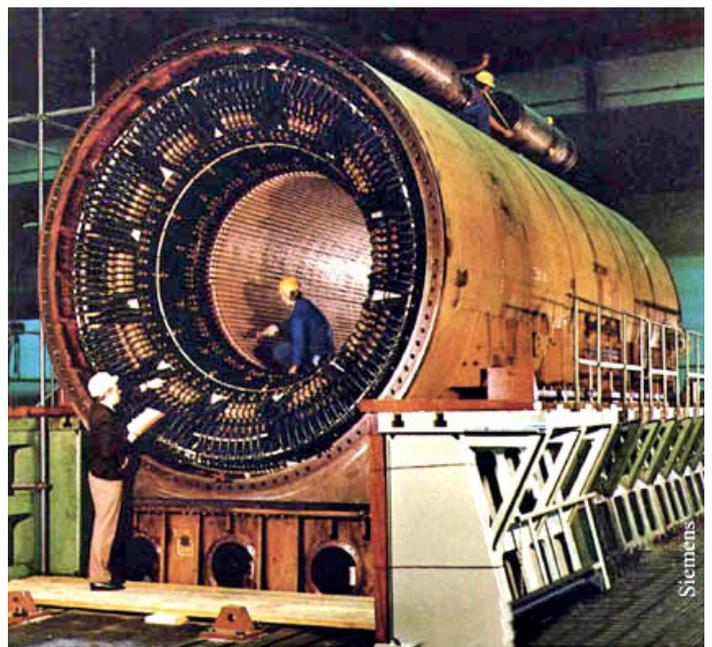
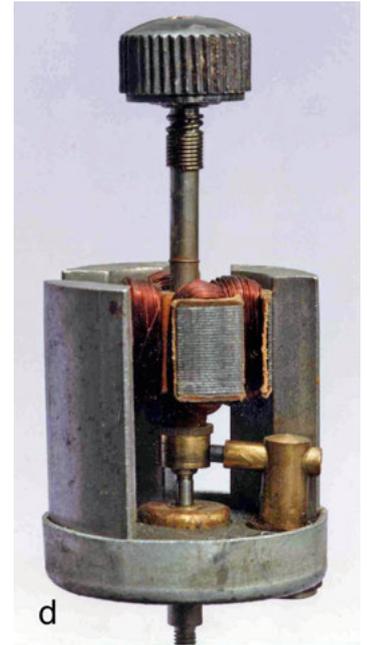
Mais les expérimentateurs n'avaient que faire de ce bizarre courant changeant de sens à chaque tour de manivelle et Ampère trouva rapidement une solution pour « redresser » ce courant, en le transformant en pseudo-continu.

L'un de mes anciens professeurs, M.Capelle, expliquait à ses élèves l'erreur du génial Ampère, qui avait ainsi engagé pour 50 ans la technique électrique dans une difficile voie dérivée, celle du générateur de courant continu, alors que la solution, évidente pour nous, depuis 1890, était le courant alternatif. Les électriciens ont bien pardonné son erreur à Ampère comme ils l'avaient fait à Volta.

On leur doit plus que beaucoup.

D'autant que la voie vers ce courant alternatif était bien entrouverte dès 1832, puisque le principe des deux composants essentiels de nos réseaux étaient inventés simultanément en deux ans : le transformateur, le tore de Faraday (I-5) et l'alternateur de Pixii. Mais pour avoir l'idée de relier les deux fils du tore à la machine de Pixii, puis d'en exploiter les inéluctables conséquences, l'alternatif, il faudra attendre le déroutant Gaulard en 1883 (IV-2).

Mystère des détours obscurs de l'intelligence humaine que les philosophes de l'histoire des sciences explorent, sous le nom d'épistémologie. L'erreur comme l'aveuglement font partie du lent processus scientifique, au même titre que l'intuition, le génie et le hasard.

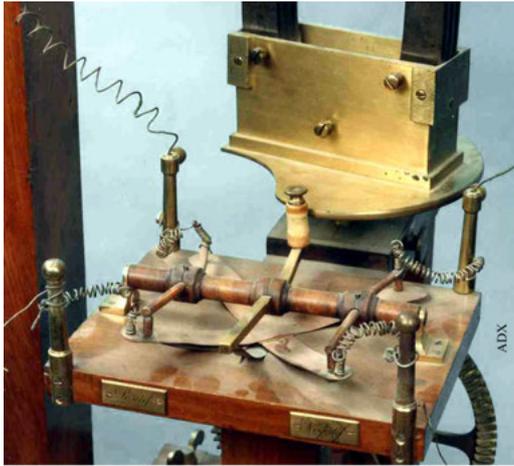


e Alternateur Siemens

Pour clore cet « arrêt sur images », déroulons-en le générique :

Le principe de ce premier générateur, l'induction, était dû à Faraday, sa conception à Ampère et sa réalisation à Pixii fils, dont il a gardé le nom. Les deux premiers cités n'ont jamais réclamé que leur nom y soit associé. Ils étaient d'assez rares découvreurs ou inventeurs qui ne travaillaient ni pour la gloire, ni pour l'argent.

5) Ampère conseilla donc à Pixii de modifier sa machine pour qu'elle produise un courant circulant toujours dans le même sens, comme le courant continu, redressé suivant notre vocabulaire. Il lui proposa une bascule électrodynamique, petit montage qui lui avait servi 12 ans plus tôt pour inverser facilement le sens du courant dans ses expériences (f). Pixii exécuta alors une nouvelle version, à bascule, de sa machine, enfin capable de décomposer l'eau en ses deux constituants, grâce à ce nouveau courant produit par des aimants et la force humaine. Il circulait en permanence, alors que le courant d'induction de Faraday était normalement fugitif.



f Bascule-redresseur

Son acte de naissance fut la note d'Ampère à l'Académie du 29 octobre 1832 :

« Note sur une expérience relative au courant produit par la rotation d'un aimant, à l'aide d'un appareil imaginé par M. Hippolyte Pixii ».

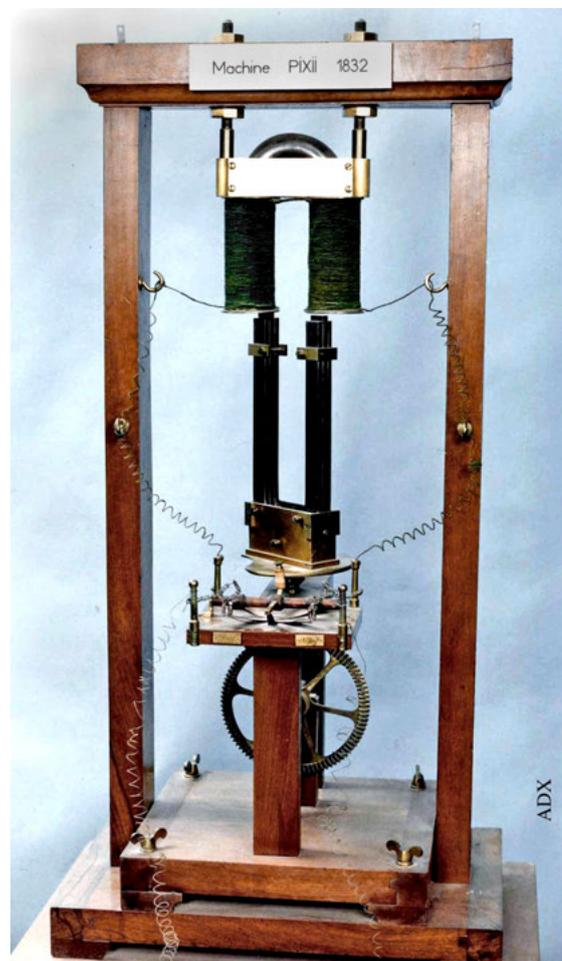
Remarquons comme Ampère s'efface pour laisser la paternité de la machine à son constructeur d'appareils scientifiques. Modestie naturelle, ou peut être aussi en remerciement de tous les bricolages et appareils d'expériences, certainement mal ou pas payés, qu'il lui avait construit depuis des années.

La machine fut présentée par Hachette à l'Académie le 26 novembre 1832 comme *Nouveaux appareils électromagnétiques* et valut à Pixii un modeste prix de 300 F. À la demande du professeur Ampère, l'appareil fut acheté 1200 F pour être confié au cabinet de Physique du Collège de France où enseignait Ampère ; deux autres plus petits, à 700 F, furent commandés pour les cabinets de physique de l'École Polytechnique et de la Faculté de médecine.

Plusieurs exemplaires de cette machine à bascule existent encore, tel celui du Musée Ampère à Poleyieux (g), réalisé par Delteil (3).

Il fallut d'ailleurs quelques temps et expériences pour vérifier que ce courant magnétique ou faradique, découvert par Faraday, avait bien les mêmes propriétés que le courant voltaïque ou galvanique des piles ; ce qui n'était pas évident.

Le principe d'un premier générateur électromécanique, à courant continu, était inventé, à l'échelle du laboratoire. Il devint pendant quarante ans un vaste sujet de recherches et d'améliorations pour remplacer les piles.



g machine de Pixii à bascule

Quant au premier générateur de courant alternatif, il fut remis au placard, mais obstiné, réapparaîtra épisodiquement sous des formes améliorées, jusqu'à sa redécouverte définitive 50 ans plus tard.

6) La bascule d'Ampère, compliquée à fabriquer et à régler, n'était vraiment pas pratique. Un inventeur, probablement Pixii lui-même, la remplaça par un commutateur (j), constitué de deux bagues taillées en créneau, permettant que le courant alternatif du circuit S de la machine soit transmis en permanence à chaque bague par les frotteurs F_1 et F_2 . Le circuit d'utilisation s capte un courant toujours de même sens car son frotteur f_1 change de bague à chaque demi-tour.

Ce commutateur pratique va servir de redresseur de courant, avec diverses variantes, sur toutes les machines inventées jusqu'en 1869, où Gramme le transformera en collecteur à lames multiples.

Plusieurs machines Pixii à commutateur existent encore dans les musées ; elles ressemblent aux précédentes, à bascule. Cependant celle du Musée des Télécommunications de Lyon (h) a un système d'entraînement par poulie et courroie disposé horizontalement, d'où une moindre hauteur. Sur la plaque est gravé : *Appareil Magnéto électrique exécuté par Hippolyte Pixii en 1832*. Confirmation que toutes ces variantes de machines ont été construites au cours de la même année par Pixii père et fils.

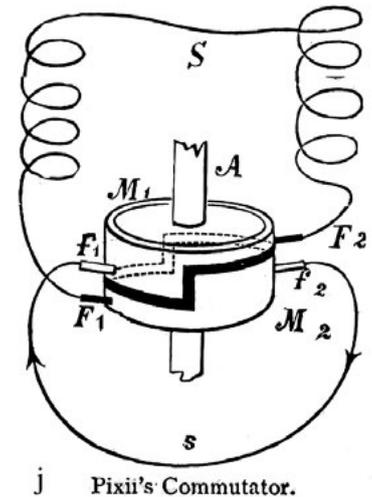


temps sans emploi d'acide, sans aucune préparation, ni détérioration. »

Notre étonnement que, 30 ans après la découverte de l'électricité, l'Académie n'y perçoive toujours pas d'autres applications que médicales. Il est vrai, les piles ne fournissaient que quelques ampères, sous peu de volts.

Machine de Clarke et autres

À la suite de Pixii, d'autres inventeurs apportèrent des perfectionnements à cette machine produisant un nouveau courant, sans pile. Ce furent les machines de William Ritchie à Londres, de Joseph Saxton à Washington en 1833, puis de l'Anglais Hyde Clarke en 1836. Cette dernière, plus petite et pratique que celle de Pixii, très proche de celle de Saxton, a été reproduite en de nombreux exemplaires (k).



Un modèle de Ducretet, exposé au CNAM (inv. 12190), a un commutateur particulier à quatre frotteurs.

À quoi allait servir cette machine bizarre, ancêtre de l'alternateur ou plutôt de la dynamo ?

À pas grand-chose, pendant au moins une quinzaine d'années ; seulement des essais de laboratoire pour la reproduction des expériences électrochimiques ou autres, normalement exécutées avec le courant de piles.

En somme, une solution sans problème, comme on en rencontre parfois dans l'histoire des techniques.

Pourtant l'Académie concluait son rapport décernant un prix à Pixii : « Cet appareil peut remplacer la pile avec avantage. Dans son emploi comme traitement médical, il fonctionne en tout



k Machine de Clarke

Elle en dérive par l'inversion des parties fixes et tournantes. L'aimant inducteur est fixe et les bobines induites tournent devant les pôles de l'aimant, comme la dynamo de vélo, mais un commutateur redresse leur courant.

D'autres poursuivent des améliorations de détails, Pohl, Page, Wheatstone, Ettighausen. La machine de Stöhrer, avec 6 bobines tournant devant trois aimants, préfigure en 1843 la génération à venir des machines à grand nombre de bobines et d'aimants. Toutes ces machines ne sont que des variantes ou de petits perfectionnements de celle de Pixii.

Elles n'apportaient pas d'élément nouveau, susceptible de préfigurer une machine opérationnelle.

Deux applications de l'électricité se dessinent. L'étude de nouvelles machines va être stimulé vers 1850 par la nécessité de trouver une source d'énergie électrique plus puissante que les piles, adaptée à deux applications émergentes :

– L'éclairage par arc électrique (III-1) Deux tiges en charbon, reliées à une pile d'une soixantaine d'éléments, produisent une lumière éblouissante si on les sépare après un bref contact. Il fallait pour maintenir cet arc un régulateur assez compliqué, mais surtout autre chose pour l'alimenter, que des piles vite épuisées. Cette lampe éblouissante, de très bon rendement, devait pouvoir remplacer les lampes à huile des phares côtiers. L'arc électrique nécessitait une source de 50 à 60 volts, et moins d'une dizaine d'ampères.

– La galvanoplastie (III-6) : L'électrochimie permettait de déposer sur un métal cuivreux un fin dépôt d'or ou d'argent, solution idéale pour l'orfèvrerie. Mais là aussi, les piles s'avéraient insuffisantes, il fallait peu de volts, mais beaucoup d'ampères.

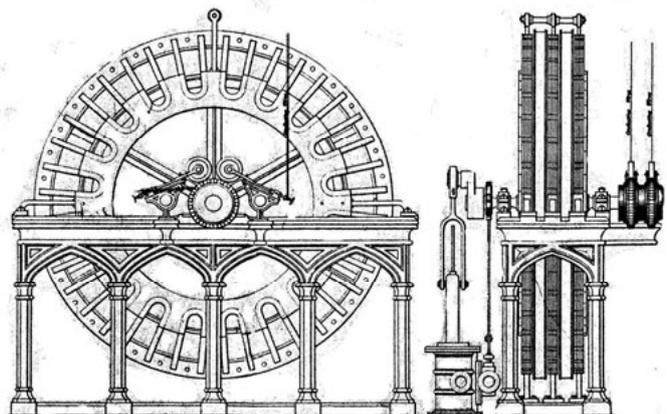
À la recherche de générateurs plus puissants.

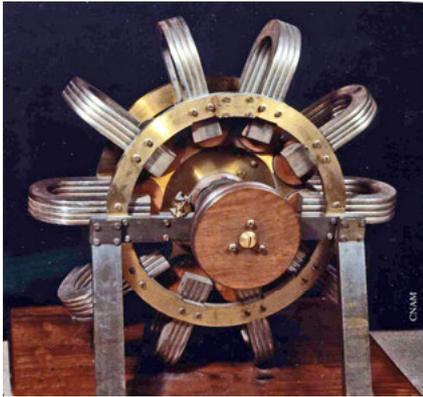
Deux constructeurs réalisèrent des machines très semblables, mais chacun d'un côté du Channel. France et Angleterre étaient en compétition scientifique stimulante. C'était un regroupement de dizaines d'éléments genre Clarke, disposés en couronne de 4, 6, ou 8 bobines induites tournant devant l'entrefer d'aimants permanents. Sur certains modèles, c'étaient les aimants qui tournaient devant les bobines. Le courant total des bobines, toujours alternativement renversé, sortait par un commutateur qui le redressait difficilement en courant ondulé, mais de même sens. Sans appareil de mesure adéquat, on ignorait d'ailleurs qu'il était ondulé.

En Grande-Bretagne, Wollrich (construisit de telles machines en 1852 pour la galvanoplastie d'Elkington.

Ce fut surtout Holmes qui conçut plusieurs modèles successifs pour l'éclairage des phares. Un essai supervisé par Faraday eut lieu à Blackwall. Ces machines équipèrent alors les nouveaux phares de South Foreland en 1859, puis de Dungeness en 1862. Il y eut beaucoup de déboires avec les fortes étincelles produites par les commutateurs-redresseurs qu'il fallait souvent réparer.

Chaque machine avait plus de 9 pieds de haut et de largeur, un poids de 5,2 tonnes ; elle





kb Machine de Wollrich

était entraînée à 90 tr/min par un moteur à vapeur de 3 hp (1). Ce mastodonte alimentait un arc avec régulateur Duboscq qui absorbait 5 à 600 W. Aujourd'hui une machine de 10 kg suffirait.

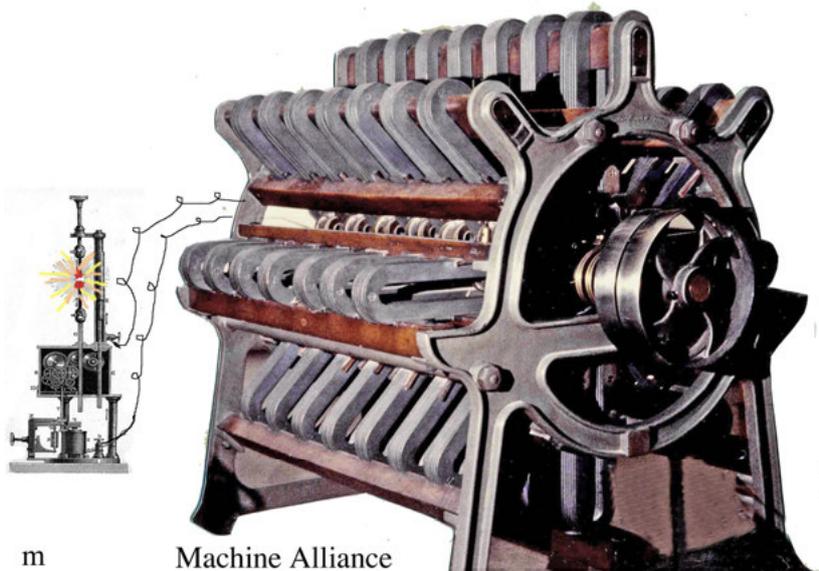
Sur le continent, Florise Nollet, professeur de physique à Bruxelles, descendant de l'abbé, célèbre au temps de l'électrostatique, se propose de construire en 1849 une machine proche de celle de Wollrich (kb) avec 5 couronnes de 16 bobines tournant entre 4 aimants fixes.

Mais il décède en 1853, néanmoins la société qu'il avait créée poursuit son projet : utiliser le courant de sa machine pour l'électrolyse de l'eau. Les gaz obtenus devaient produire du courant avec la pile à gaz de Grove (devenue pile à combustible),

en quelque sorte le mouvement perpétuel, de l'électricité pour fabriquer de l'électricité, avec un rendement plutôt faible (4). Une autre version moins plausible serait que Nollet aurait voulu concurrencer le gaz d'éclairage. La faillite s'ensuivit, au détriment financier des commanditaires, dont Napoléon III, à titre personnel. Personnage décrié en France, mais qui cultivait une passion pour les sciences et techniques nouvelles qu'il favorisait comme son oncle.

L'affaire est reprise en 1855 par Auguste Berlioz avec Joseph van Malderen, l'ancien ingénieur de Nollet, sous le vocable Compagnie de l'Alliance. Une première réalisation fut l'illumination de l'Hôtel des Invalides avec une lampe à arc. Cependant il s'avérait nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de la machine. J.P. Le Roux constata au Conservatoire des Arts et Métiers que son rendement était d'à peine 30%, le reste, 70%, étant perdu en échauffement et surtout dans les étincelles du commutateur. Alors le professeur Masson recommanda de le remplacer simplement par deux bagues circulaires sur lesquelles des frotteurs recueillaient un courant alternativement renversé.

L'étonnement fut que l'arc d'éclairage électrique fonctionnait même mieux avec cet étrange courant, le rendement était bien amélioré et les étincelles destructrices supprimées. Personne ne chercha à bien comprendre pourquoi.



m Machine Alliance

Reynaud, ingénieur en chef du service des phares français s'intéressa à cette machine de l'Alliance et l'adopta pour électrifier en 1863 un premier phare en France, celui de la Hève, près du Havre (m). La machine faisait encore 1,8 tonne, et pour parer aux pannes inévitables, on en installait deux. Suivant cet exemple, Holmes supprima aussi en Angleterre les commutateurs de ses machines.

Quelques dizaines de machines furent fabriquées par l'Alliance pour éclairer des lieux

publics ou équiper des bateaux pour la navigation de nuit, de même pour l'orfèvrerie Christofle, mais dans ce dernier cas, il fallait remettre un commutateur avec ses inconvénients pour avoir du courant continu. Il en reste dans les musées, l'une exposée au Deutsches Museum de Munich (5 ch à 400tr/min) et une autre dans les réserves du CNAM.

Une nouvelle machine améliorée remplaça l'Alliance seulement après 1878, celle de Méritens qui remédiait partiellement à l'un de ses défauts, une trop grande dispersion du flux magnétique dans l'air, mal canalisé par des pièces en acier.

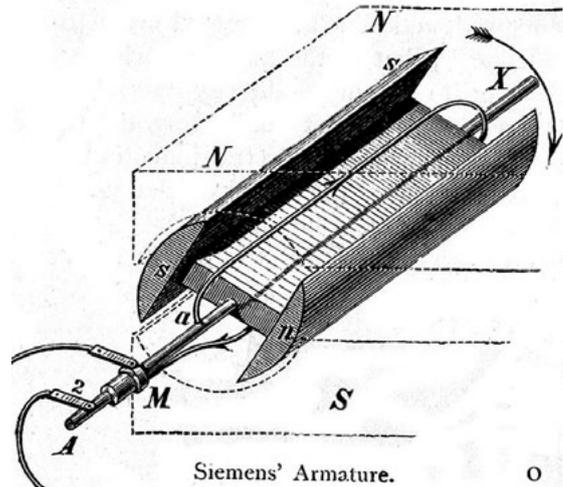
Trois perfectionnements avant la solution définitive

Sciences et techniques avancent rarement par un grand bond, plutôt par une série de petits pas. Trois furent nécessaires avant d'arriver à la solution tant cherchée.

L'armature Siemens

Même dans la machine précédente, une grande partie du flux magnétique, les lignes de force des aimants permanents, se dispersait dans l'air autour de la bobine induite, sans y pénétrer. Il fallait changer la forme des pièces polaires en fer de l'inducteur et l'armature de l'induit.

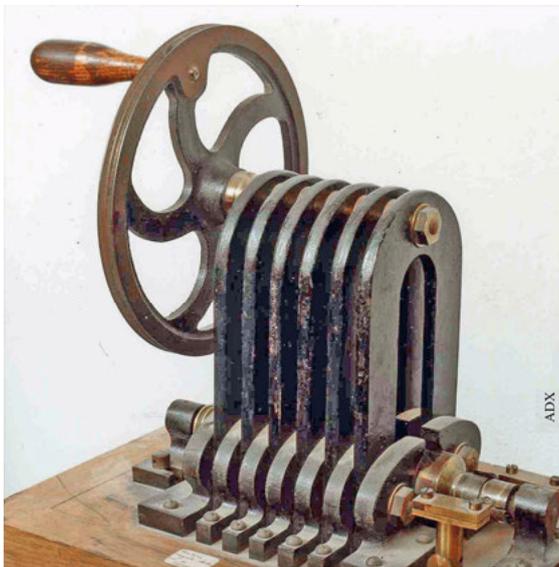
Ce que réalisa en 1856 un nouveau venu sur la scène électrique, le jeune lieutenant prussien Werner Siemens, inventeur d'une petite machine avec un induit en forme d'un long cylindre de fer, presque complètement enveloppé par les pièces polaires de l'aimant inducteur (o). Le cylindre était creusé de deux rainures pour y placer les fils de la bobine induite ; sa section avait alors la forme d'un *Doppel T Anker*, ou armature en double T, ou en H.



Siemens' Armature.

O

Depuis cette époque, le terme armature, traduction d'*Anker*, a souvent désigné la pièce massive en fer sur laquelle était enroulé le bobinage induit. Chez les Anglais ce fut le *Drum*.



p1 Machine Siemens- H Anker

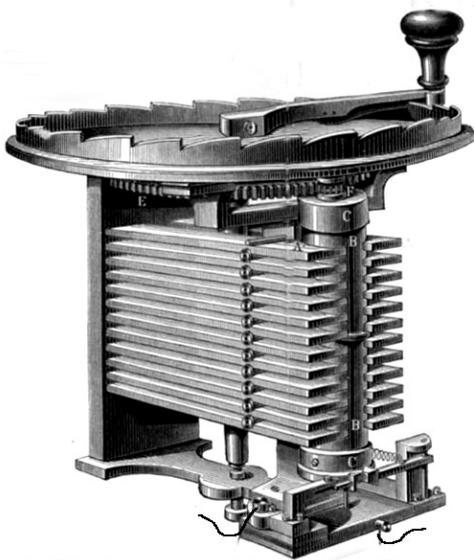
Le résultat se révéla satisfaisant, mais le courant produit s'obstinait toujours à être alternativement renversé ; il fallait le transformer en courant continu avec un commutateur.

Siemens construisit un petit générateur à aimant permanent sur ce principe (p1) ; de même plusieurs Anglais, Wheatstone, Varley et Wilde s'en inspirèrent. Mais le problème des étincelles au commutateur empêchait d'augmenter la puissance de ces petites machines de laboratoire.

De plus, Siemens avait réalisé son armature en fer massif, ignorant que pour des puissances plus élevées, celui-ci allait chauffer en gaspillant de l'énergie par circulation de courants induits dans le fer, révélés depuis peu (1851) par Foucault. Mais c'était sans importance, cette machine à manivelle n'avait pas pour objectif de fournir de la puissance, mais seulement de remplacer occasionnellement les piles. On constata aussi qu'en

alimentant la machine avec des piles, elle tournait en moteur ; cette réversibilité ne présentait pas encore grand intérêt.

Curieusement, ce générateur était dérivé d'un manipulateur de télégraphe original inventé par Siemens. À la place des piles, il transmettait des impulsions de courant du générateur électromagnétique actionné à la main, (p2). L'armature verticale (induit) est soumise au champ de plusieurs aimants permanents horizontaux.



p2 Manipulateur télégraphique Siemens

Pour envoyer une impulsion de courant, on tourne la manivelle d'un cran de la roue à rochet ; les engrenages multiplicateurs entraînent alors la rotation de l'armature d'un demi-tour. En tournant plusieurs tours du manipulateur, on actionnait la sonnerie au poste récepteur. Siemens qui fut l'un des innovateurs en matière de télégraphe (V-1), faisait ainsi une première incursion dans le domaine de l'énergie électrique.

Une fois encore, la recherche d'une solution à un problème particulier débouche sur une innovation imprévue, ouvrant des perspectives dans un domaine différent. Mais il faut à l'inventeur un esprit ouvert et imaginatif, apte à sortir des chemins conventionnels, la *serendipité*

La machine de Wilde

Tous ces générateurs étaient magnétoélectriques, le champ magnétique inducteur étant créé par un aimant permanent en acier spécial, conservant bien le magnétisme, après avoir été aimanté un instant dans un bobinage électrique.

Pourquoi ne pas remplacer cet aimant par un électro-aimant plus puissant, ont certainement songé nombre de constructeurs ? L'idée avait été proposée par William Sinsteden en 1851, mais il paraissait peu rationnel d'utiliser une autre source d'électricité, une pile, pour alimenter l'électro-aimant inducteur d'un générateur d'électricité. Le Danois Soren Hjorth avait présenté à Londres en 1851 une machine où l'action de l'aimant permanent était renforcée par un bobinage alimenté par le courant de la machine elle-même.

La solution était simple, il suffisait d'entraîner simultanément, avec le moteur manuel ou à vapeur, une autre petite machine à aimant permanent, apportant son courant à l'électro-aimant inducteur de la machine principale. Ce fut



q Machine Wilde 1864

Wilde de Manchester qui concrétisa en 1864 cette idée avec la première génératrice à électro-aimant inducteur (q). Mais elle nécessitait une petite machine supplémentaire pour exciter la principale. Ce n'était pas très pratique.

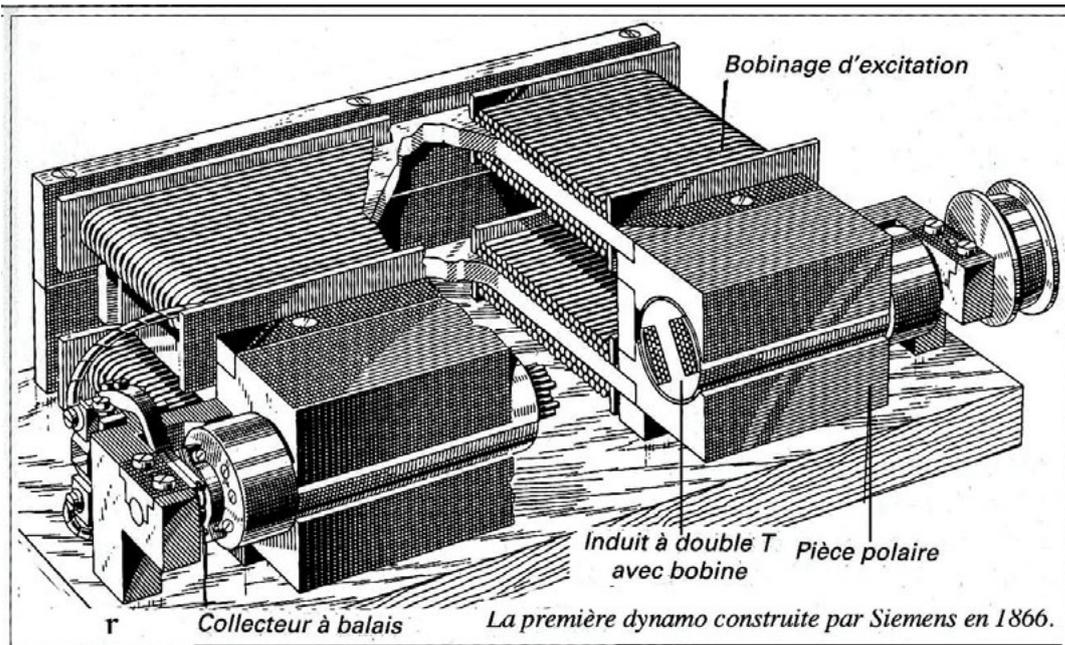
L'autoexcitation

Poggendorff, physicien allemand, avait dénommé « *magnétisme rémanent* » ce faible magnétisme qui subsiste longtemps dans une pièce en fer ou mieux en acier, brièvement magnétisée par un électroaimant. Cette propriété, variable suivant la qualité de l'acier, fut à l'origine d'un notable perfectionnement.

Presque simultanément (1866/67) trois électriciens constatèrent qu'il était inutile de prévoir une petite machine supplémentaire comme l'avait proposé Wilde, pour l'excitation de l'inducteur ; il suffisait de brancher l'électro-aimant inducteur aux bornes de la machine principale (ce que nous appelons le montage shunt ou en parallèle). Au démarrage, le magnétisme rémanent de l'inducteur suffisait à produire un léger courant, lequel venait renforcer l'effet primaire qui l'avait créé.

La machine montait ainsi progressivement en puissance jusqu'à son régime normal. Une petite partie seulement du courant utile était dérivée en permanence pour exciter l'électro de l'inducteur. Il fallait néanmoins créer une première fois ce magnétisme, en alimentant quelques instants l'inducteur avec des piles. Gramme découvrit même par hasard en 1874, que même le faible magnétisme terrestre suffisait à cette première aimantation.

L'un des inventeurs, Siemens dénomma alors son générateur sans aimant, mais avec électro-aimants, *dynamomaschine* (r), les machines **dynamo-électriques** remplacèrent alors les **magnéto-électriques**, à aimant (5).



Comme l'idée de remplacer les aimants inducteurs par des électros était dans l'air du temps, une querelle de priorité se déclencha pour savoir qui, de C.Varley, Ch.Wheatstone ou W.Siemens avait fait la première publication ou réalisé une machine. Peu importe, il semblerait que ce soit Siemens.

Plus tard, en 1867, William Ladd présentait une curieuse machine à *autoexcitation* comprenant deux armatures induites, le courant de l'une ne servait qu'à exciter les inducteurs, celui de l'autre était seul utilisable - principe que l'on retrouvera dans la première machine Gramme de 1871.

L'inéluctable fatalité de l'énergie accumulée dans une inductance

Toutes ces machines de laboratoire n'étaient que des modèles de faible puissance, incapables d'alimenter un arc d'éclairage de quelques centaines de watts. En augmentant la puissance, leur construction se heurtait à l'accroissement des étincelles destructrices au commutateur, ce redresseur de courant par inversion à chaque alternance.

Cette fatalité résulte du problème, longtemps incompris, de l'accumulation d'énergie électromagnétique dans l'inductance de tout circuit parcouru par un courant, amplifiée dès que ce circuit est un bobinage à nombre de spires plus élevé, encore augmenté si ce bobinage entoure un noyau magnétique en fer ou acier. Cas de toutes les machines électriques.

Dès qu'il y a séparation de contact par le commutateur, à l'instant où le courant (alternatif) va changer de sens, cette séparation ne peut se produire à l'instant exact où l'intensité du courant passe par zéro. L'énergie résiduelle dans l'inductance, élevée en raison du fer, proportionnelle au carré de l'intensité I de la rupture, ($1/2 L I^2$), va alors se dissiper en chaleur dans l'arc ou étincelle. Elle se manifeste dès que l'intensité coupée I dépasse un ampère ; d'où fusion de métal et détérioration progressive du commutateur.

C'est la conséquence du phénomène de l'extra-courant de rupture, découvert par Faraday, qui ne sera compris théoriquement qu'à la fin du siècle par Heaviside.

Encore en 1930, Paul Janet, l'un des premiers professeurs d'électricité depuis 1893, écrivait que « **ce problème des étincelles aux balais était l'un des plus difficile pour la construction des machines.** »

– Solution : Trouver un système d'enroulement des bobines induites tel que le courant qui y circule ne soit jamais coupé, donc un circuit fermé. On pourrait penser que ce courant étant alternatif il suffit de le couper à l'instant où il est fugitivement nul, deux fois par période. Même encore aujourd'hui, aucun système mécanique n'est assez fiable pour séparer deux contacts avec la précision souhaitée ; couper un courant presque au zéro, à un ampère, amorce une étincelle (6).

– Autre alternative : Comprendre que cette coupure fugitive du courant résulte de la nécessité (?) de « redresser » le courant de la machine de Pixii. Mais pourquoi donc ne pas utiliser directement son courant alternativement renversé ? C'est aller trop vite, le cerveau des électriciens mit longtemps pour trouver ce raccourci élémentaire pour nous — tout simplement l'alternateur.

Cette gageure, de ne pas couper le courant induit (alternatif, non nul) dans un bobinage fermé, était de seulement le dériver en deux points, problème résolu par le collecteur à recouvrement de Gramme. Il mettait fugitivement en court-circuit, par les balais eux-mêmes, la section d'enroulement connectée aux deux lames voisines du collecteur. Ceci entraînait la réduction à zéro du courant qui en était très proche, donc dissipait l'énergie accumulée dans cette section, supprimant ainsi toute possibilité même d'une mini-étincelle. Pas du tout évident.

L'invention de sa machine repose sur ce point essentiel qu'il n'a certainement pas compris sur le plan théorique, mais découvert intuitivement par tâtonnements, expériences et observations, sa fructueuse méthode de travail. D'ailleurs, les deux autres inventeurs de machines à collecteur très proches, Pacinotti avant Gramme, Alteneck après, ne sont pas arrivés au résultat final, faute d'avoir conçu les balais de leur collecteur avec ce recouvrement qui peu paraître un détail.

On résume trop sommairement l'invention de Gramme, comme étant la première machine fiable, conçue pour l'industrialisation, sans expliquer pourquoi. Alors qu'elle est typique de la résolution, avec des artifices expérimentaux, d'un problème théorique essentiel, incompris. Souvent on attribue le rôle principal à l'anneau sur lequel était enroulé l'induit, alors qu'un disque ou un cylindre convenait aussi bien, comme l'expérience le prouvera.

Confusion fréquente entre objectif et moyen.

La machine Gramme

L'importance de la machine Gramme vaut qu'on s'attarde sur cette laborieuse marche vers un générateur de courant continu puissant, industriellement endurant et d'un coût acceptable. Aucune des multiples petites machines inventées en 40 ans n'avaient pu dépasser le stade de la machine de démonstration, valable en laboratoire, sans plus.

À l'époque, on maîtrisait déjà bien la construction mécanique, apprise avec les moteurs à vapeur ; mais une machine électrique c'est en plus un assemblage de trois éléments, du fer (ou acier doux) pour canaliser le champ magnétique, du cuivre pour véhiculer le courant et des matériaux isolants pour éviter tout contact entre les conducteurs sous tension et la structure métallique de la machine. Les isolants étaient encore très rudimentaires, coton ou mieux soie et gutta-percha, sorte de caoutchouc.

Gramme, Zénobe, Théophile, était un menuisier belge, autodidacte en électricité, comme l'apprenti relieur Faraday, le bricoleur en mécanique Edison, le peintre Morse et bien d'autres.

À l'époque, avec de l'intelligence, de l'observation et de la persévérance, il était assez facile d'apprendre dans divers traités les rudiments d'électricité nécessaires pour l'utiliser. Des cours gratuits pour les ouvriers étaient enseignés le soir au Conservatoire des Arts et Métiers. (7)

Gramme ne pratiquait pas n'importe quelle menuiserie, mais avait été formé à la technique de conception des modèles précis de pièces de fonderie, ou des rampes d'escalier. D'où une bonne aptitude à la géométrie dans l'espace qu'impose le dessin industriel des pièces mécaniques et épures de montage.

Ses contacts avec l'électricité commencent en 1860 à l'Alliance où son ami de Bruxelles, Van Malderen, lui propose un travail de modeler, nécessitant de la précision et l'interprétation du dessin technique. Le modeler doit réaliser le modèle en bois qui servira à obtenir un moule en sable, pour y couler une pièce en fonte souvent compliquée. Il participe à l'électrification du premier phare français de la Hève en 1864. Passionné par l'électricité en pleine gestation, sujet qu'il étudie dans ses temps libres, il va travailler en 1863 chez Ruhmkorff, puis dans la galvanoplastie chez Christofle où il réalise qu'il faudrait supprimer ces rangées de piles avec leurs odeurs chimiques, mal remplacées par ces lourdes machines de l'Alliance à courant redressé, dont il faut changer régulièrement les commutateurs.

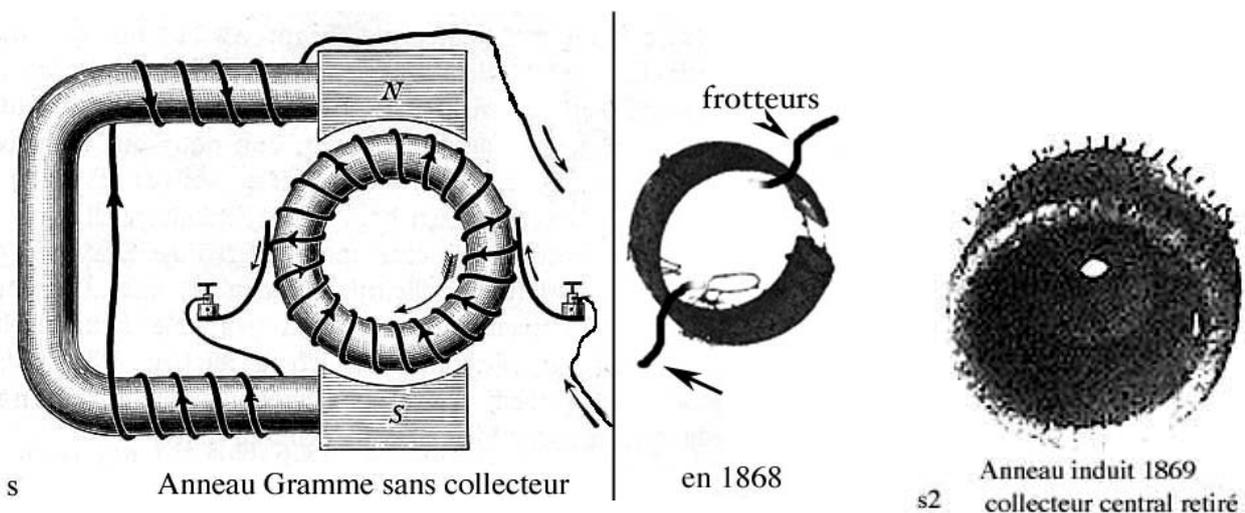
Le 24 décembre 1863, il fait prendre par un intermédiaire, Mathieu, sachant bien rédiger en français, un premier brevet sur des « Perfectionnements aux machines magnéto-électriques », du type Alliance. Pendant les années 1864 et 1865 il travaille pour l'ingénieur Ernest Bazin à l'éclairage électrique des ardoisières d'Angers, puis à Lorient.

L'émergence

En 1867, ayant bien analysé les défauts des machines de l'Alliance, il prend un autre brevet, payé par son père, sur d'autres « Perfectionnements apportés aux machines magnéto-électriques ». Il y propose en particulier de remplacer les aimants par des électro-aimants parcouru par un courant emprunté au circuit principal, l'autoexcitation. Le brevet est déposé trop tardivement, au moment de la querelle d'antériorité évoquée ci-avant entre trois électriciens reconnus.

Menant simultanément ses travaux de recherches et un travail indispensable pour vivre, l'année 1868 le trouve à Londres chez le célèbre photographe Disderi pour réaliser les délicates structures en bois des premiers appareils de studio.

De cette époque date un premier prototype de machine sans collecteur, où des frotteurs recueillaient directement le courant sur une couche de fil dénudé, enroulée sans fin sur un anneau en tôle de fer. (s)



Sur l'ancienne et mauvaise photo de 1868, à droite, les frotteurs étaient appuyés sur le côté de l'anneau, solution inadéquate entraînant l'usure des fils dénudés.

Domage que cet appareil ait été perdu, il illustre exactement la résolution du premier problème fondamental de la dynamo, dériver un courant continu entre deux points diamétralement opposés d'un enroulement fermé parcouru par un courant alternatif induit. Pour remplacer ces frotteurs usant les fils de l'induit, Gramme imagine alors son premier collecteur en 1869. Sur la mauvaise photo s2, le bobinage de l'anneau induit a été divisé en sections ; à chaque jonction de deux sections, un fil est relié à une lame du collecteur, un tambour en bois rainuré, fixé à l'intérieur de l'anneau, mais retiré sur la photo. Chaque lame est une pièce de cuivre encastrée dans une rainure du tambour. L'idée est une multiplication par n du commutateur à 2 bagues de toutes les machines précédentes, lequel servait déjà de précaire redresseur de courant. L'idéal était d'avoir le plus grand nombre possible n de lames, chacune n'étant connectée qu'à un nombre minimum de spires de l'induit.

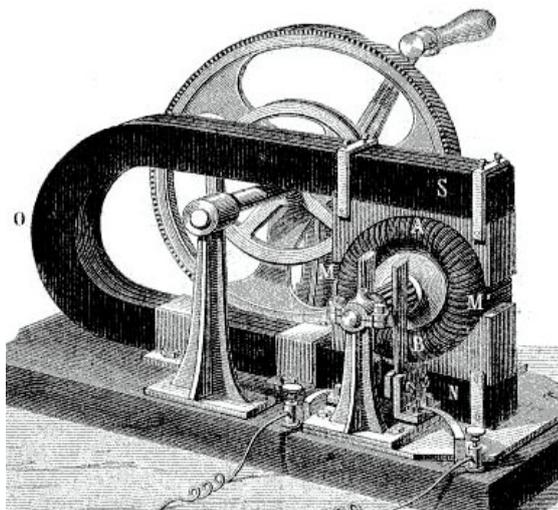
La collection des premiers appareils de la Société Gramme a été dispersée après l'exposition de 1900, ne nous laissant que ces obscures photos pour reconstituer la progression de l'invention avec ses machines successives (8). Un livre de Sartiaux les décrivant est accessible sur le web (9).

Le collecteur à recouvrement

Il semble y être arrivé par un raisonnement déductif à partir du premier prototype sans collecteur de 1868, dont les frotteurs avaient l'inconvénient de capter le courant directement sur le fil dénudé du bobinage. Il ne s'était pas bien rendu compte que c'était la clef de l'efficacité de sa machine. S'il l'avait breveté correctement, il pouvait bloquer pendant 15 ans toutes les machines qui ont repris ce collecteur, Altenek - Siemens, Edison et des dizaines d'autres. Mais en Europe on ne savait pas encore bien poser et exploiter les brevets comme en Amérique. Autant Gramme était à l'aise devant un établi, autant il était emprunté pour la parole en français, né avec le patois wallon.

C'est pendant cette période, 1866/1870 qu'il conçut ses premières machines, dont les brevets ont été déposés fin 1869, grâce à l'aide financière de Louis Bréguet, homme affable et généreux, horloger et constructeur réputé de machines de précision. Cinq machines et perfectionnements y sont décrits : la petite machine de laboratoire à aimant, deux machines à électro-aimants inducteurs de 2 à 6 pôles, avec 1 à 3 armatures en anneau juxtaposées, une machine à armature en forme de disque à la place de l'anneau.

Quand il présenta à Bréguet le prototype de sa première machine à aimant, celui-ci ne lui laissa pas d'illusion sur l'espoir de réussite de son projet ; et pourtant Bréguet fabriqua pendant 15 ans, à partir de 1870, cette machine de laboratoire entraînée à la main, (t) ainsi qu'une variante à aimants verticaux.



t Machine magnéto-électrique Gramme - 1869

Sur probablement un millier, il en existe encore 26 exemplaires, pour l'enseignement dans les lycées français, certainement d'autres ailleurs et à l'étranger (10).

En 1869 une modeste Société des machines magnétoélectriques Gramme est alors créée. La guerre franco-prussienne de 1870/71, perdue par la France après le dramatique siège de Paris, puis la révolte de la Commune, le contraint à retourner en Belgique où il travaille sur ses machines et réussit à vendre une première licence de fabrication.

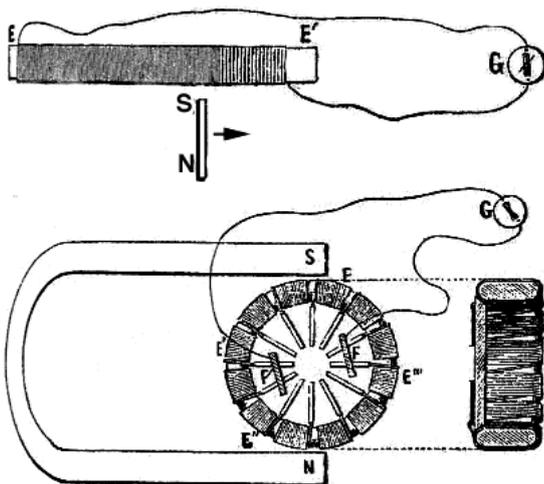
À peine revenu à Paris en juin 1871, il fait présenter à l'Académie par Jamin le 17 juillet 1871 une note : « Sur une machine magnéto électrique produisant des courants continus », accompagnée de l'une de ses machines prototypes.

À l'Académie, seul un académicien pouvait présenter une note en séance. Pourquoi avoir demandé à Jamin, un professeur connu, alors que Gramme était encore un ouvrier, ignoré dans ce monde scientifique ? Jamin était spécialiste des aimants permanents et la conception de la première machine Gramme-Bréguet l'avait intéressé sur ce point.

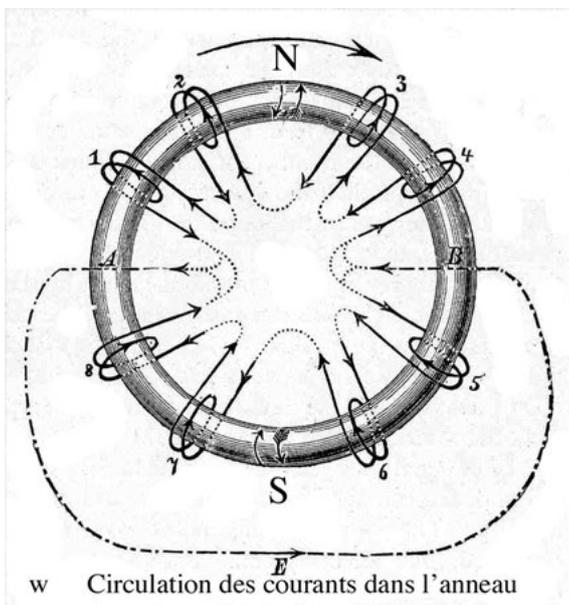
L'invention

Généralement le raisonnement, parfois la simple intuition qui a conduit l'inventeur à sa découverte est difficile à saisir. Ce n'est pas le cas de cette note claire destinée à l'Académie, sans doute rédigée avec un ami en Belgique, car Gramme pratiquait plus aisément le patois wallon que l'écriture en français littéraire.

Avant tout, n'oublions pas que le fléau de toutes les machines précédentes était ces étincelles destructrices, résultant de l'interruption suivie de la reconnexion en sens inverse du circuit principal, pour transformer le courant naturellement alternatif de toutes les machines à induction en courant redressé, pseudo continu.



v machine Gramme - note du 17/07/1871



Gramme avait donc cherché, comme d'autres, à ne pas interrompre le circuit où se développait le courant induit alternatif. La figure (v) de sa note montre bien sa solution de recourber complètement (par l'imagination) le barreau rectiligne, transformé alors en anneau, sur lequel on peut donc enrouler un fil sans fin, ininterrompu. Restait à dériver en deux points fixes le courant circulant dans l'anneau en rotation; la première idée était celle de frotteurs sur la périphérie du bobinage dénudé (ci avant).

Puis ce fut la division du bobinage en sections, reliées en série, et dérivation du courant vers un segment tournant avec l'anneau, sur lequel un frotteur fixe dérivait le courant vers l'utilisation (w).

Quelques extraits significatifs de cette note :

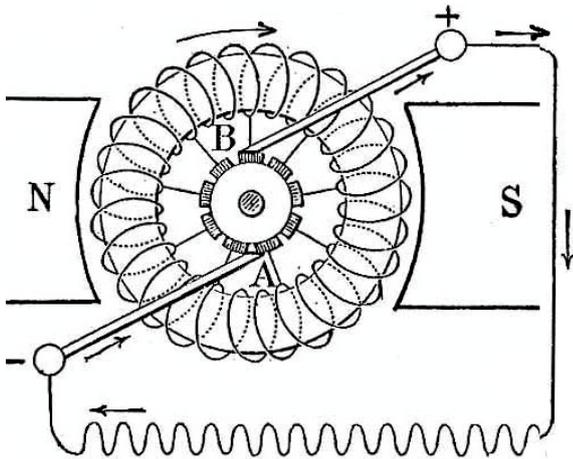
« Les courants d'induction sont en général instantanés et se produisent alternativement en sens contraire. Il n'est cependant pas impossible d'en produire qui échappent à ce double caractère.

Considérons un long électro-aimant EE', sur lequel on a enroulé un fil conducteur isolé ; si l'on présente un aimant SN comme l'indique la figure (v), et si l'on fait mouvoir cet élément parallèlement à lui-même... le pôle S développera dans le fer un pôle magnétique qui se déplacera comme l'aimant SN... Il entraînera dans le conducteur un courant d'induction qu'on peut rendre sensible avec le galvanomètre G.

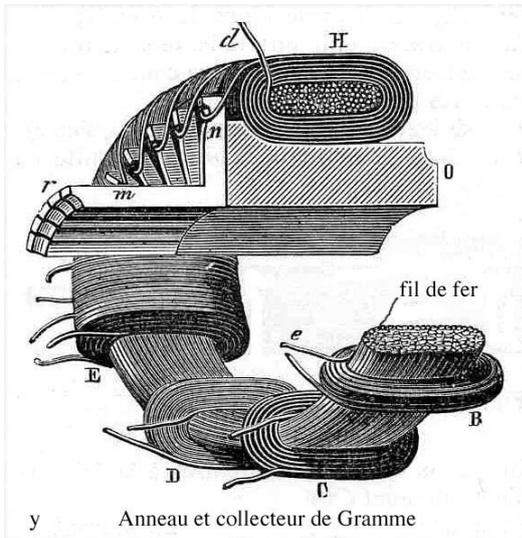
Ce courant ne sera pas du tout instantané ; il conservera le même sens pendant toute la durée du déplacement de l'aimant entre E et E', durée que l'on peut faire varier... (w)

...Cette expérience conduit à penser que par l'emploi d'artifices convenables, il est possible de réaliser un appareil fournissant des courants continus indéfiniment. »

Supposons que l'électro-aimant prenne la forme circulaire E, E', E'', E'''. Soumettons le à l'action des deux pôles NS d'un aimant... et que l'électro-aimant tourne d'un mouvement uniforme. Le pôle S produira dans la partie de l'anneau proche un courant dans un sens déterminé comme précédemment. On comprend aisément que le pôle N produira dans son voisinage un courant de sens contraire au précédent. Enfin, dans les deux parties de l'anneau placées à angle droit, qu'on peut appeler moyennes, aucun courant n'est produit.



X Anneau Gramme avec collecteur.



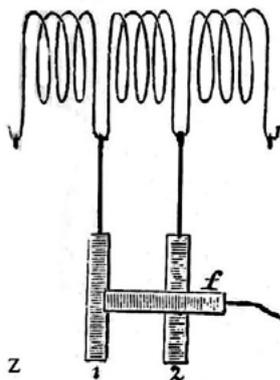
y Anneau et collecteur de Gramme

Pour recueillir les deux courants contraires produits simultanément dans le fil de l'anneau, il suffit d'établir deux frotteurs FF' correspondants aux parties moyennes, qui sont comme les rhéophores (les bornes) de cette pile d'un nouveau genre (x)...quelques détails sur ces frotteurs... tels qu'ils sont dans la machine mise sous les yeux de l'Académie (u). Si le fil enroulé est très gros ... avec une seule rangée, il suffit de le dénuder sur une ligne et d'établir les frotteurs pressant sur cette partie nue... » (s).

Puis la description de l'enroulement du fil «...De cette façon, tout le fil enroulé sur l'anneau forme un conducteur sans fin, divisé en un certain nombre de parties dont les points de jonction sont soudés à des pièces en laiton d'une solidité et forme convenable pour résister à un frottement prolongé (le collecteur) (y)...les frotteurs y appuient à la fois sur plusieurs d'entre elles (z) ».

« Il est aisé de comprendre comment on peut faire agir sur un même anneau deux aimants au lieu d'un, soit quatre pôles accompagnés de quatre frotteurs... Il est possible de substituer aux aimants excitateurs des électro-aimants animés par une partie du courant de la machine (autoexcitation) suivant la méthode connue (Siemens). »

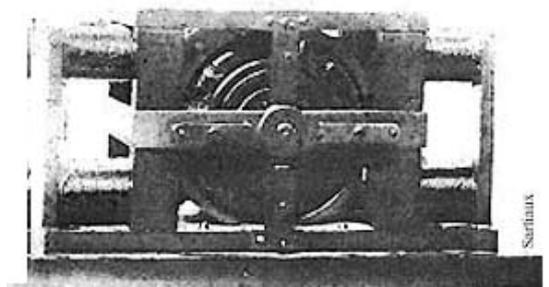
La machine soumise à l'Académie est précisément de ce genre ; elle présente deux électro-aimants, et par conséquent quatre pôles agissant sur l'anneau. Elle a quatre frotteurs, dont deux conduisent la moitié du



z Gramme's Arrangement o Prevent Sparking.

courant dans les électro-aimants, tandis que les deux autres fournissent le courant extérieur.

Cette machine est mise en mouvement au moyen d'un volant mu à bras d'homme. Elle permet de rougir et de fondre 25 cm de fer de 9/10 de mm de diamètre...(za)



za Machine à 4 pôles de 1871

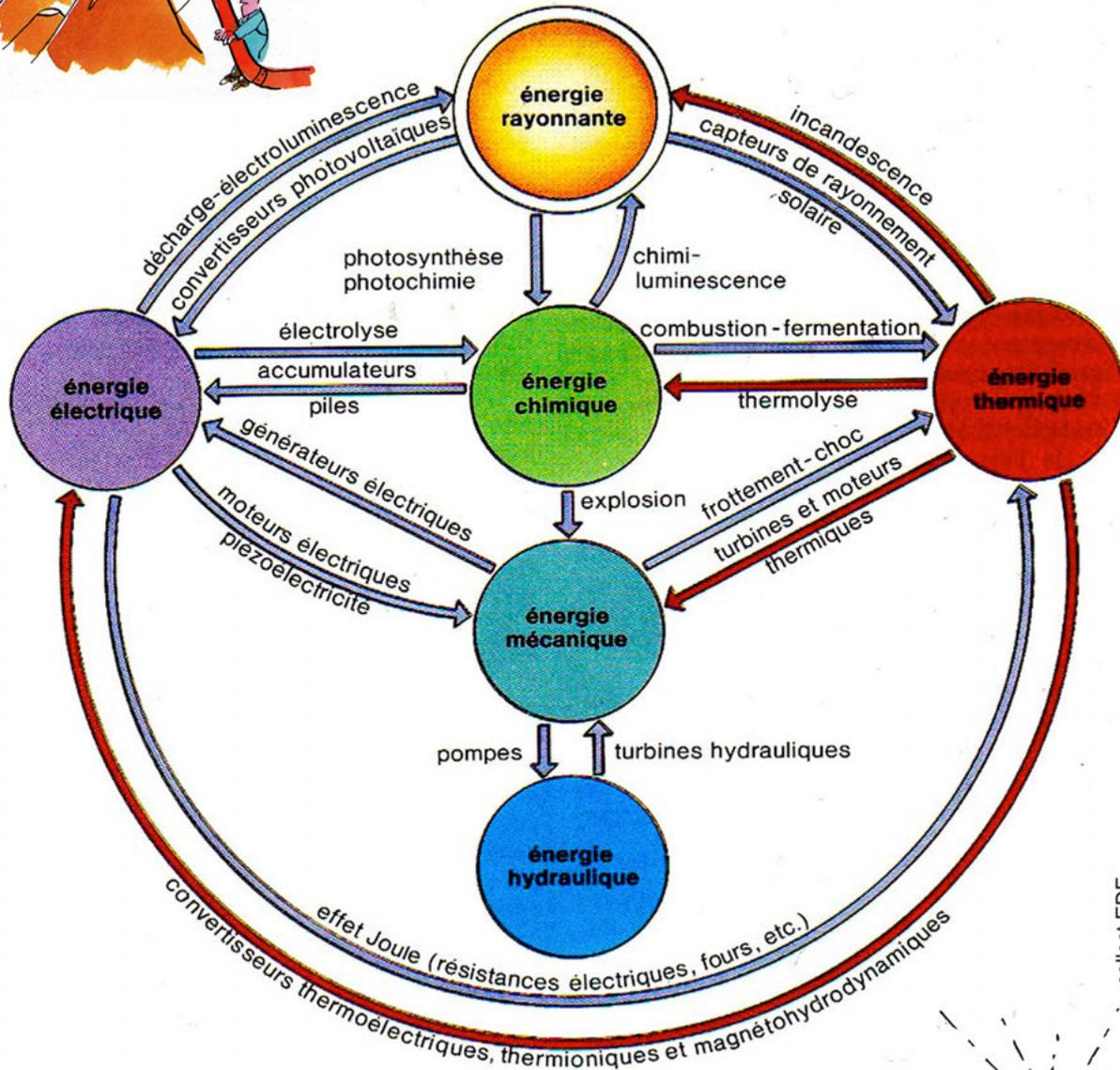
Pages 48 à 73 non reproduites

Suite .../.....



Sans convertisseur, la source d'énergie la plus fabuleuse reste inutilisable.

L'HISTOIRE DE L'ÉNERGIE, C'EST L'HISTOIRE DES CONVERTISSEURS



collect EDF

Conversions des différentes formes d'énergie

Sans le bon convertisseur, la voiture solaire a peu d'avenir



Pages 75 à 83 non reproduites

Suite .../.....

Les centrales thermiques nucléaires

Bref historique : Les Américains avaient débuté leurs recherches pour la bombe atomique dès leur entrée en guerre en 1942, peu après que le principe de la fission nucléaire a été découvert en 1938 par le chimiste allemand Otto Hahn et la physicienne juive allemande Lise Meitner. C'était une conséquence du célèbre, $e = mc^2$.

Pour obtenir quelques kg du produit fissile nécessaire, l'uranium 235, très dispersé dans l'uranium ordinaire 238 (0,7%), Fermi construisit la première pile ou réacteur qui se mit à produire aussi du plutonium 239, élément fissile inconnu. On constata la grande quantité de chaleur indirectement produite, et l'idée vint rapidement de remplacer ainsi les chaudières à charbon des centrales électriques.

Sur le plan de la chaîne des conversions énergétiques, cela constituait un raccourci très attrayant. Convertir directement l'énergie nucléaire en chaleur, puis électricité, au lieu de la longue chaîne : nucléaire dans le soleil > rayonnement vers la terre > photosynthèse de végétaux > carbonisation > combustion du charbon, gaz, pétrole, avec oxygène > chaleur.

Dès 1949, Westinghouse aux Etats-Unis préparait un réacteur à eau pressurisée pour sous-marins. Plusieurs filières de centrales nucléaires ont été développées dans divers pays à partir de 1950. En URSS, une centrale d'essai démarre à Obninsk en 1954. La première centrale du monde, opérationnelle, est inaugurée en Angleterre par la Reine à Calder Hall en 1956, elle durera 47 ans et sera suivie à partir de 1965 d'un programme de 12 centrales en 11 ans. L'Allemagne met en service en 1969 sa première centrale, Obrigheim en première étape, suivie de 19 autres qui comme en France couvriront plus de 50% de ses besoins dans les années 1980. Le Japon met en service une première centrale à Fukushima en 1970. Aux Etats-Unis, c'est TMI 1 en 1974.

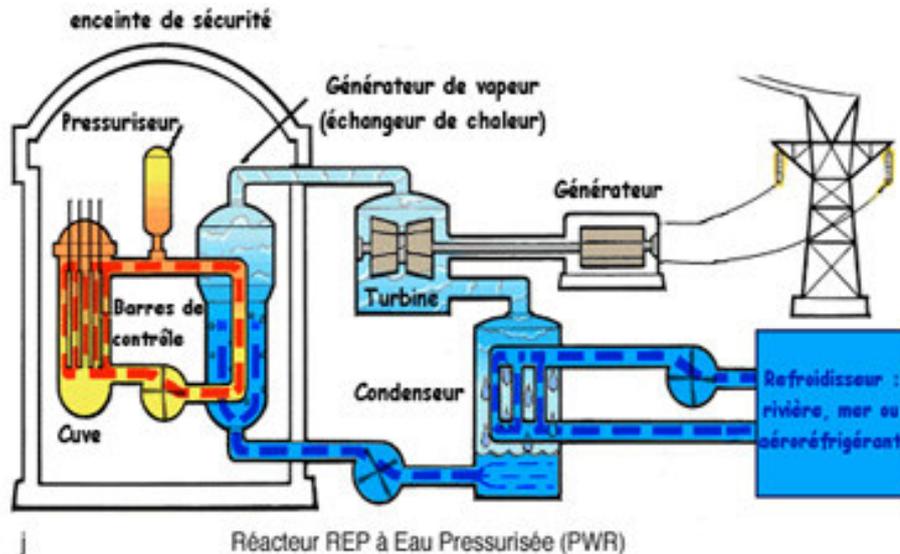
En France, le procédé graphite-gaz à uranium naturel avait été mis au point par le CEA, mais après des années d'essais à Chinon 1962-1967 et de discussions, le choc pétrolier qui fit tripler le prix du pétrole précipita les décisions (II-6). En 1974 était alors démarré un programme important pour remplacer les centrales thermiques à fioul en développement par le procédé américain PWR, ou REP en français (réacteur à eau pressurisée), sous licence Westinghouse. C'est le plus répandu dans le monde. Un autre procédé américain, REB (réacteur à eau bouillante) a été développé par G.E.Co. L'URSS développa d'autres procédés, dont le RBMK, qui équipait Tchernobyl. Au Canada, le CANDU est une variante des précédents avec modérateur à eau lourde.

Une autre filière, prometteuse à terme, mais plus complexe, le réacteur à neutrons rapides RNR, a été expérimentée dans plusieurs pays, pour anticiper l'épuisement de l'uranium prévu dès l'origine, puisque surgénérateur ou renouvelable, pouvant même produire plus de combustible qu'il n'en consomme. En France, après Rapsodie, 20 MW thermiques en 1967, ce fut Phénix, qui a produit 300 MW électriques à Marcoule pendant 30 ans sans problème. Ensuite le consortium NERSA, français - italien - allemand - iranien, a construit Superphénix, prototype industriel de 1200 MW en 1985, arrêté en 1998 par décision politique, bien qu'il fonctionnât par sécurité à mi-puissance, 600 MW, sans problème grave. Dans les dix pays qui ont construit des RNR, sept ont abandonné provisoirement, le combustible qu'ils fabriquaient revenant plus cher que celui-ci extrait des mines, donc sans intérêt immédiat. Seul fonctionne l'un des BN600 russe, mais 3 nouveaux modèles sont en construction en Russie, Inde et Chine, 3 en projet en Russie, Japon, Etats-Unis. Ce serait la solution nucléaire mixte du milieu du siècle, en particulier pour consommer la surabondance de plutonium, résultant de la destruction de milliers de têtes de bombes nucléaires américaines et russes.

Dans une centrale nucléaire, toute la partie turbine à vapeur entraînant l'alternateur, est identique à celles des centrales à flamme. Seule diffère, la chaudière produisant la vapeur d'eau primaire, qui

dans les REP, va céder sa chaleur dans un échangeur à un circuit de vapeur secondaire indépendant, non irradiée, pour alimenter la turbine classique entraînant l'alternateur (j).

Les conceptions actuelles ne permettent pas encore d'atteindre une température de vapeur très élevée, 300 à 350° C, donnant un rendement global de 33 % pour les filières REP et REB. Le refroidissement de la vapeur au condenseur est identique à celui des centrales à flamme (d).



Caractéristiques spécifiques du nucléaire

Sans reprendre les nombreuses informations connues, les particularités et problèmes des filières actuelles, sont à souligner, compte tenu qu'à moyen terme, après épuisement du pétrole et du gaz, le nucléaire reste encore aujourd'hui comme la seule solution de remplacement des énergies fossiles comme énergie de base, capable d'une disponibilité à 90 % du temps.

1) De la chaleur uniquement

Dans son exploitation actuelle, l'énergie nucléaire est incapable de générer autre chose que de la chaleur, pas d'énergie mécanique comme le pétrole ou le gaz, encore moins de l'électricité en direct. Elle partage ce handicap avec le charbon, mais un peu plus accentué. La transformation globale en électricité, avec les filières actuelles, impose de perdre les 2/3 de la chaleur, à température trop faible, environ 40°C, sinon pour chauffer quelques serres au voisinage immédiat de la centrale.

Néanmoins deux solutions sont envisageables pour récupérer cette importante quantité de chaleur, destinée principalement au chauffage des locaux d'une grande ville proche.

– Tout d'abord le système de cogénération évoqué ci-avant pour les turbines à gaz, mais déjà appliqué différemment à certaines centrales thermiques à flamme. Dans celles-ci, la vapeur communique son énergie dans une turbine à 2 ou 3 étages successifs de pressions et températures. On procède alors à un soutirage partiel de vapeur, avant le dernier étage à 150°C environ, pour l'envoyer vers un réseau de chauffage éloigné d'une dizaine de km, longueur limitée par la perte de chaleur, même dans des conduites très bien isolées. Bien sûr, l'énergie fournie par la turbine au générateur sera réduite d'autant. Cette cogénération classique avec les centrales thermiques à flamme, pourrait être pratiquée dans des centrales nucléaires conçues au départ avec des turbines adaptées, mais une limitation reste la proximité de la centrale d'une grande ville, rare pour le nucléaire. Les centrales thermiques puissantes, classiques ou nucléaires, sont installées surtout à côté d'une source de refroidissement, fleuve ou mer.

– Pourquoi alors ne pas utiliser directement la chaleur d'un réacteur, sans passer par l'électricité, pour des usages thermiques tel le chauffage urbain ou certains processus industriels, sachant que la chaleur ne se transporte pas très loin ? Il faudrait des unités de petite puissance, donc théoriquement

moins rentable, sauf si l'on prend en compte leur rendement trois fois plus élevé. L'idée avait été proposée par le Centre d'Études nucléaires de Grenoble (CENG) en 1960, une mini centrale thermique Thermos, fournissant uniquement de l'eau chaude à 150°C pour le chauffage urbain, quand il n'y aura plus de fuel, ni de gaz, bientôt (?). Mais quid de la sûreté d'un réacteur au milieu d'une grande ville ?

Une société américaine, Hyperion Power Generation, ainsi que Toshiba au Japon proposent pour cet usage un petit réacteur d'une totale sécurité passive (ou intrinsèque) de 10 à 25 MW thermique avec un combustible nucléaire, l'hydruure d'uranium, tel que la réaction stoppe automatiquement si la température dépasse un certain seuil, excluant ainsi l'accident ultime de la fusion du cœur. Il serait enterré, sans presque d'entretien, et rechargeable en usine tous les 10 ans. Étudié par le célèbre LANL, Los Alamos National Laboratory, il a été présenté à la conférence de l'A.I.E.E à Vienne, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

Mais le chauffage urbain, bien assuré pour quelques décennies principalement par le gaz, un peu par la combustion des ordures, éventuellement par la géothermie, n'apparaît pas un problème urgent. Pourtant ce chauffage nucléaire direct, à sécurité intrinsèque, fournirait trois fois plus de chaleur que le chauffage à l'électricité d'origine nucléaire, pour un prix bien moindre.

2) Un investissement important

Sur le plan économique, par rapport aux centrales thermiques classiques, le nucléaire engage un coût d'investissement de plus du double d'une centrale à flamme pour la génération II actuelle, impliquant un pourcentage élevé d'amortissement dans le prix du kWh, plus de 60%. Inversement le combustible représente une part faible dans ce prix, 10 à 12 % environ ; en effet, malgré un prix au kg très élevé, la quantité de combustible d'un réacteur est minimale. Le changement se fait entre un et deux ans d'utilisation.

Économiquement cela implique que la centrale doit fonctionner le plus possible à forte charge et au moins 5 à 6000 heures/an pour avoir un prix de revient du kWh réduit, pratiquement le plus bas de toutes les autres sources d'énergie. En sortie de centrale, en moyenne annuelle, 3,5 à 4 c€/par kWh en 2010

Le prix actualisé d'investissement d'une centrale de 1200 MW des années 1980 serait de 1,5 à 2 G€. Celui d'une centrale EPR de 1600 MW prévu à 3 G€ serait de 4 à 5 G€ en 2009, suite à des surcoûts imprévus de génie civil, comme sur la première centrale finlandaise.

3) Retours d'expérience des accidents (5).

Toute technique industrielle, surtout très nouvelle, progresse essentiellement par le retour d'expérience, acquis par les accidents et incidents, comme tous les moyens de transport, avions, trains, navires, automobile. Combien de crash a-t-il fallu pour atteindre aujourd'hui le haut niveau de sécurité des avions, machine complexe et vulnérable ? Pour le nucléaire, c'est un sérieux handicap, ils ont été rares, heureusement pour les victimes et les dégâts, mais pas pour l'expérience cumulée, indispensables pour les perfectionnements.

Trois accidents majeurs se sont produits en 40 ans sur 450 réacteurs terrestres en service.

Une cause initiale a provoqué en cascade des dysfonctionnements et erreurs humaines, aboutissant à la fusion du cœur par absence de refroidissement à l'arrêt, conséquence inéluctable par manque d'eau et/ou d'énergie électrique pour actionner les pompes.

- Three Mile Island II (TMI) 1979

Ce réacteur de type PWR, mis en service six mois avant l'accident, est situé à côté d'Harrisburg, Pennsylvanie aux USA.

La cause initiale a été une défaillance matérielle d'un élément essentiel, une pompe principale. Pour plusieurs raisons, le personnel n'a pas réussi à bien identifier le problème ni à y remédier. Le cœur mal refroidi a commencé à fondre. Des dégagements d'hydrogène sont apparus et firent craindre une explosion qui eut cependant lieu, mais très atténuée par un relâchement contrôlé de gaz radioactif.

L'enceinte de confinement a bien joué son rôle, rien n'en est sorti, le cœur a été ensuite complètement démonté et analysé, il était fondu à 45%, mais n'avait pas encore percé la cuve.

Classé au niveau de gravité 5, il a apporté des enseignements précieux en particulier sur les procédures de conduite par l'homme, par événement ou bien par état, d'une machine automatisée par informatique, beaucoup plus complexe qu'une locomotive ou un avion. De plus, il a donné lieu, en France et probablement dans les autres pays, à l'équipement de toutes les centrales à enceinte de confinement de dispositifs d'absorption d'hydrogène, filtrant les gaz radioactifs par du sable, pouvant être relâchés en urgence, évitant ainsi l'explosion. Pour raison inconnue, ce système n'avait pas été installé à Fukushima, où il aurait évité les explosions et leurs conséquences.

La responsabilité de l'accident TMI en revient au constructeur du matériel défaillant et à l'exploitant privé. Il n'y a pas eu de victime. C'est jusqu'à présent le seul accident résultant d'un dysfonctionnement de la machine nucléaire.

- Tchernobyl en 1986

Le réacteur n°4 de cette centrale, située en Ukraine, était du type soviétique RBMK, différent des réacteurs américains REB ou REP

La cause initiale a été un essai de simulation d'arrêt brutal et redémarrage instantané suite à la destruction du réseau électrique par une attaque atomique. Sans attendre le démarrage des groupes d'alimentation de secours, il fallait raccrocher instantanément en utilisant l'énergie cinétique de l'alternateur. L'essai ordonné par le ministre de la défense était risqué, déconseillé par les spécialistes aux politiques, comme le spécifiaient les procédures.

En effet, à faible puissance un réacteur subit un empoisonnement, qualifié de pic xénon, qui peut l'amener à l'emballement. Un réacteur à l'arrêt en urgence doit y rester plusieurs jours.

De plus, le RBMK était naturellement instable à petite puissance (coefficient de vide positif). Perdant le contrôle du réacteur, Diatlov, adjoint du chef de centrale absent, fit procéder à des manœuvres interdites par les instructions, qui se terminèrent par l'explosion thermique, et par l'hydrogène, en dispersant dans l'atmosphère des tonnes de graphite incandescent radioactif, car il n'y avait pas d'enceinte de confinement d'un mètre d'épaisseur comme dans les PWR.

La gestion de l'accident fut lente et désastreuse comme l'on sait. Il a été bien plus catastrophique que le précédent, 31 morts officiels à l'explosion, probablement 20 000 après parmi les liquidateurs, qui savaient qu'ils risquaient la mort comme dans une guerre, plus 200 000 malades. Techniquement, il n'a pratiquement rien appris.

Le système autocratique soviétique, fonctionnant avec un secret interne absolu, dont cet accident a accéléré la décomposition, en porte toute la responsabilité, que ce soit l'utilisation d'une machine ayant 3 défauts graves, ou l'ordre inconscient du ministère de la défense de procéder à un essai risqué, ainsi que la gestion catastrophique de l'accident. Il reste une dizaine de RBMK encore en service, mais des modifications leur ont été apportées en particulier le système de descente des barres de contrôle qui s'étaient coincées.

- Fukushima en 2011

Sur la côte nord-est du Japon, sont installées 5 centrales regroupant 18 réacteurs du type BWR, différent du PWR utilisé en France. La centrale Fukushima Daïchi, juste en bord de mer, comprend un premier groupe de 4 réacteurs dont le premier, installé depuis 1970, un second groupe de 2 réacteurs plus récents installés à 500 m des premiers, plus en hauteur.

Au moment du tremblement de terre de force maximum 9, tous les réacteurs en service sur cette côte se sont mis à l'arrêt automatiquement. Il n'y a eu que des dégâts rapidement solutionnés, les bâtiments ayant été construits pour des séismes de force 8. A Daïchi, deux des pylônes électriques reliant la centrale au réseau sont tombés. Les groupes de secours ont alors démarré pour les réacteurs 1, 2 et 3 arrêtés, en phase de refroidissement forcé d'une semaine.

Cinquante minutes après, sont arrivées les vagues du tsunami, dont la plus importante est montée à 13 m de hauteur, elle a atteint la plateforme sur lequel ont été construits les 4 premiers réacteurs, haute de 10 m au dessus de l'océan. La photo montre les espaces submergés en bleu. Tout a été submergé, les groupes de secours qui alimentaient les réacteurs en eau de refroidissement étaient noyés. De même les batteries de secours pour alimenter l'éclairage et l'instrumentation de contrôle et commande des réacteurs 1 et 2 étaient noyées. Les transmissions d'informations coupées.

Les opérateurs dans la salle de contrôle plongés dans l'obscurité, essayaient de comprendre ce qui se passait, ne contrôlaient plus le fonctionnement, en particulier le niveau d'eau dans les cuves de réacteur contenant le combustible radioactif qui devait rester impérativement immergé. L'eau ayant deux rôles, l'un de caloporteur et l'autre de ralentisseur des neutrons. (j2)



Sans eau, ni électricité pour actionner les pompes, l'enchaînement inéluctable s'enclencha malgré des arrosages extérieurs à l'eau de mer, la température du cœur augmenta. Pour le refroidir, il fallait rouvrir une vanne du condenseur, manœuvre que les agents de la centrale ignorait et qui retarda de 2 h le refroidissement. Au dessus de 800°C la décomposition de l'eau produit de l'hydrogène qui explosa en détruisant le bâtiment. Puis la fusion du combustible le fit s'accumuler au fond de la cuve acier, le

corium, mais la perça à 2000°C. Les produits radioactifs se sont alors répandus et diffusés dans l'eau de mer d'arrosage et l'atmosphère.

Le processus se reproduisit, seulement un peu décalé, pour les 3 réacteurs. Pour le n°4, à l'arrêt « froid », le problème fut le manque d'eau de la « piscine » contenant du combustible usagé en voie normale de décroissance naturelle de sa radioactivité, avant évacuation.

Il n'y pas eu de mort, mais une forte pollution radioactive sur un large territoire.

La cause initiale a été une erreur humaine peu excusable, dont sont responsables conjointement le constructeur TEPCO, l'Agence de sûreté nucléaire japonaise et le gouvernement, qui n'ont pas remédié en 30 ans à l'erreur initiale, faite pour une première centrale en 1970 : Avoir construit une centrale nucléaire à 10 m seulement au dessus du niveau de la mer ; aucun des 12 autres réacteurs de la côte n'ont subi de dégâts par le tsunami, étant installés à hauteur suffisante. Il n'est pas compréhensible que ces 4 réacteurs n'ait pas été construit 500 m plus en retrait de la côte sur la hauteur. La photo montre que la zone inondée n'avait guère plus de 300 m.



j3 Figure3-7 Submersion de la digue de Fukushima Dai-chi (TEPCO)

Une digue de 5,7 m avait été construite pour protéger des tempêtes normales, uniquement les bouches de prise et de rejet d'eau de mer assurant le refroidissement normal du condenseur des turbines.

Un simple mur de 4 à 5 m, construit en bordure de la plateforme côtière déjà haute de 10 m, aurait évité la catastrophe.

En effet, plus au Nord sur cette côte Est, la petite ville de Taro avait construit en 1960, dix ans avant Fukushima, une digue impressionnante haute de 10 m. Taro avait connu un millier de morts lors des grands tsunamis, en 1896, puis celui de 1933. Malgré cela, la digue a été submergée d'environ 2 m, limitant cependant à 200 le nombre de morts. Le monde entier a vu cette vague géante en boucle à la télévision.

La photo j3, prise du toit de la salle des machines, montre la vague arrivant sur la plateforme de la centrale.

Le rapport sur Fukushima, de 189 pages, rédigé par l'IRSN française est accessible sur l'URL - irsn.fr. Cet accident majeur n'aura rien appris sur la cause initiale, sinon qu'un simple mur l'aurait évité, mais des enseignements ont été tirés pour la conduite d'un réacteur REB ayant perdu ses deux groupes de secours et ses pompes.

Deux autres accidents importants sont survenus, en 2002 à la centrale REP de Davis-Besse dans l'Ohio, classé niveau 5, nécessitant deux ans de réparations, puis à Forsmark en Suède sur un réacteur REB, en 2006, classé niveau 2, sans dommages.

En France, tous les incidents sont automatiquement déclarés par l'exploitant à l'ASN qui fait contrôler par l'IRSN les remèdes apportés et informe le public en les classant avec plusieurs critères de gravité en 7 catégories.

4) La sûreté

Elle est, et restera toujours le problème majeur de la production de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire. On ne pourra jamais la garantir absolue, pas plus que celle des avions, voitures, l'utilisation du gaz, de l'électricité, pas plus que les milliers de morts annuels dans les mines de charbon. Sauf si l'on adoptait, après confirmation de leur sécurité intrinsèque, des mini réacteurs tels que ceux proposés par Hypérion pour le chauffage urbain, ou bien si l'on démarre les 15 ans de recherches internationales pour la génération IV (6). Avec le parc actuel, même amélioré à la suite de trop rares accidents, il est inéluctable qu'il y en aura d'autres plus ou moins graves, tous les 20, 40 ans? On savait et l'on sait mieux aujourd'hui que le nucléaire est une machine très complexe donc très dangereuse en cas d'erreur de conduite ou dysfonctionnement.

Les accidents graves sont en fait des enchaînements de problèmes :

- soit d'une soudaine défaillance technique d'un élément de la machine (TMI),
- soit une faute majeure de conduite pour raison politico-militaire (Tchernobyl), comparable à faire exécuter un looping à un airbus ayant des défauts de conception connus.
- soit une erreur majeure d'installation (Fukushima) restée 40 ans sans qu'on y remédie, tellement c'était simple, sur une côte où les tsunamis sont connus depuis des siècles.
- soit une catastrophe ou cause humaine non encore imaginée, dans tous les scénarios d'accidents.

Ces causes initiales entraînent alors la perte des systèmes de sûreté, principalement le refroidissement à l'arrêt, d'où risque de fusion du cœur.

Le premier et troisième accident ont mis en évidence qu'un **maillon faible de la chaîne de sûreté** était le refroidissement du réacteur après un arrêt d'urgence. Il nécessite impérativement de l'eau et de l'électricité pour faire fonctionner les pompes à eau, afin d'évacuer la chaleur toujours produite, environ 6% du fonctionnement à pleine charge, ne diminuant progressivement qu'en plusieurs jours. En cas d'arrêt brusque de l'alimentation électrique normale des pompes, on ne dispose

que de quelques heures pour que l'un des deux ou trois groupes électrogènes de secours démarrent. Sinon le processus devient irréversible, risque d'explosion d'hydrogène pour les REB, et début de fusion du cœur, percement de la cuve et diffusion massive de radioactivité.

L'accident TMI avait conduit les constructeurs de centrales, américains, russes, français (EPR d'Areva), Toshiba japonais, à envisager des modèles de génération III (6) prévoyant la sécurisation renforcée des systèmes de refroidissement à l'arrêt, alimentation en eau et deux bâtiments séparés, de chacun 2 groupes électrogènes de secours, soit 4 groupes pour le pompage de cette eau. Surtout, comme cette défaillance peut amorcer la fusion du cœur, cette éventualité ultime est maintenant prévue dans la conception, avec un réceptacle pour recueillir le corium en fusion ayant percé la cuve, supprimant ainsi toute manifestation extérieure, mais d'un coût plus élevé.

Aucun accident ne s'est terminé par le plus redouté dans l'esprit du public, l'explosion atomique type bombe. C'est heureusement une impossibilité physique, le taux d'enrichissement de l'uranium d'une centrale étant de 20 fois moindre que celui indispensable pour une explosion nucléaire. L'explosion de Tchernobyl était une explosion thermique

Mais le chemin sera long pour approcher d'une sûreté maximale. Pour des procédés et machines industrielles bien moins complexes comme l'auto ou l'avion, cela a nécessité un siècle. Le nucléaire n'a que 40 ans d'expérience sur les premiers filières.

5) Agence Internationale de la Sûreté Nucléaire

Chaque pays possédant des réacteurs nucléaires a constitué une ASN, Autorité de Sûreté Nucléaire, composée de spécialistes du nucléaire de haut niveau, en principe indépendants des industriels constructeurs et des exploitants de centrales. Elle est chargée par le gouvernement, de l'application des lois spécifiques sur le contrôle de toutes installations avec l'expertise de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN, de la coordination, de l'information des exploitants comme du public.

Ce système national a été amélioré en France, comme dans d'autres pays à la suite des accidents cités, mais se révélera insuffisant si des centrales sont construites dans des pays n'ayant pas une forte expérience du nucléaire, même s'ils constituent leur propre ASN.

Il existe bien l'A.I.E.A. Agence Internationale de l'Energie Atomique chargée par le Conseil de sécurité de l'ONU, de promouvoir l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire et surtout veiller à la non-prolifération. Mais cette agence n'a pas vocation, ni pouvoir légal, ni compétence scientifique et technique, pour contrôler et obliger ces acteurs à respecter des règles internationales de sûreté à définir, synthèse des règles des ASN nationaux.

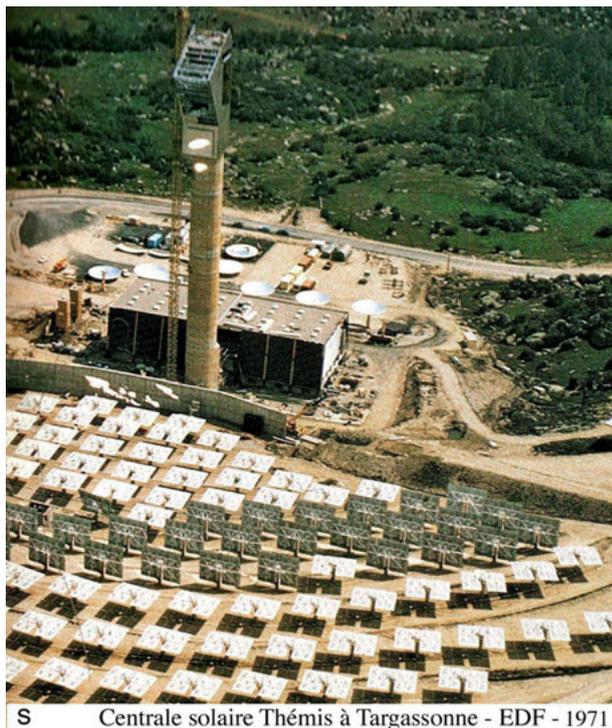
La création d'une telle agence s'impose, avec des scientifiques indépendants des exploitants, constructeurs et gouvernements rendant des comptes uniquement à l'ONU au plus haut niveau, à un Conseil de sécurité nucléaire, ayant les mêmes pouvoirs de contrainte que le Conseil actuel de sécurité politique. Toute mise en service d'une nouvelle centrale serait soumise à son approbation, comme toute installation industrielle ou navire l'est sous le contrôle des organismes spécialisés, Véritas ou autre.

Elle a été recommandée par le prix Nobel G. Charpak après Tchernobyl. Des grandes puissances comme les USA et la Chine s'y opposent. L'avis d'un prix Nobel compte infiniment moins que celui des politiciens incompetents ou inconscients qui gouvernent tant de pays, totalitaires comme démocratiques.

Combien d'accidents graves faudra-t-il pour que cette Agence soit créée, et impose l'étude de réacteurs d'une nouvelle génération (IV aujourd'hui) plus sûre? Le nucléaire est un outil industriel qui ne peut échapper à la loi inéluctable des perfectionnements par paliers, celle de toute machine depuis 150 ans. Nous abordons à peine le troisième palier.

Pages 90 à 104 non reproduites

Suite .../.....



S Centrale solaire Thémis à Targassonne - EDF - 1971

En 1983, EDF améliore le principe et met en service la première centrale solaire à concentration au monde, Thémis, à Targassonne près des Pyrénées, où l'ensoleillement élevé permet un taux de disponibilité proche de 18 %. Une centaine de miroirs solaires, orientables automatiquement pour rester perpendiculaires au soleil, concentrent leurs faisceaux sur une chaudière installée au sommet d'une tour et la vapeur turbinée fait tourner un alternateur. (s) Suite à sa trop faible productivité, l'installation a été arrêtée après trois ans d'essais décevants. Elle a été reprise à titre expérimental par divers organismes qui pensent l'améliorer de quelques %.

Sur ce principe, des centrales solaires thermiques à concentration, dites thermodynamiques, cela fait plus scientifique pour le profane, sont à nouveau construites depuis quelques années dans plusieurs pays. Elles permettront d'expérimenter des variantes de capteurs solaires orientables

ou cylindro-paraboliques, comme ceux de Meadi, ainsi que des chaudières et autres liquides caloporteurs. De même des systèmes d'accumulation d'énergie, pour essayer de reporter de quelques heures la indisponibilité de cette énergie aux heures de pointe sans soleil, 18 à 21 h. Il faut attendre quelques années pour juger des résultats techniques et économiques.

Le principe de la concentration a l'avantage de remédier un peu à la trop grande diffusion de l'énergie solaire dans l'espace, mais victime du rendement thermodynamique de Carnot, comme toutes les centrales thermiques ; il ne permet de recueillir que 20 à 30% de l'énergie du soleil pendant quelques heures. Par comparaison, le procédé photovoltaïque en recueille théoriquement 10 à 12%, pour un coût d'investissement moins élevé.

Les utilisations thermiques directes de la chaleur solaire, tel le chauffe-eau solaire, ont un rendement de 80%, pour un investissement peu supérieur aux procédés électriques ou gaz. Mais bien moins subventionné, leur développement en France reste très lent.

La conversion du rayonnement solaire en chaleur puis énergie mécanique pour des pompes et autres applications artisanales peut aussi se faire à moindres frais, à petite échelle diffuse, localement, sans passer par la transformation en électricité et mériterait plus de développements dans les pays tropicaux.

L'impact médiatique est par contre bien plus spectaculaire si l'on génère de l'électricité à grande échelle pour la transporter au loin, des déserts africains jusqu'en Europe. Théoriquement c'est possible, mais se heurte à de sérieuses difficultés techniques, pratiques et financières, en plus du coût et des pertes de longues transmissions en HVDC, non interconnectables. S'y ajoutent la disponibilité réduite à 3 ou 4 heures avant et après le midi solaire, sans stockage à grande échelle pour fournir la pointe de fin de journée, le péage financier et probablement aussi politique des pays traversés par la transmission, l'abrasion rapide par le vent de sable des surfaces de capteurs et miroirs.

Cependant un projet grandiose, Désertec, est envisagé avec le système à concentration. Pourra-t-il se concrétiser ?

Chiffres : En 2010, l'énergie électrique produite dans le monde par les systèmes solaires atteint 0,2% du total, une production encore très marginale (h). Les principaux producteurs mondiaux sont l'Espagne pour 32,1%, l'Allemagne pour 28,9%, le Japon pour 13,3%, les Etats-Unis pour 11,3%,

l'Italie pour 3,1%, la Chine et la France pour 1%. En Europe où le solaire a été très développé depuis 10 ans, il représente 0,7% de la production.

Des recherches restent encore à poursuivre pour la réduction de prix des cellules, de même l'optimisation des centrales à concentration. Mais faute de nouvelles pistes valables, des recherches sur le stockage d'énergie en quantité notable ont une probabilité de réussite très faible, comme pour l'éolien. Ces optimisations n'amélioreraient guère la quantité d'énergie produite par an, car le talon d'Achille de l'intermittence pénalise le solaire encore plus que l'éolien, le taux de charge annuel étant en France inférieur à 10%, soit 1 à 2% de plus que l'Allemagne et 2 à 3% de moins que l'Espagne. Rappelons que pour produire le même nombre de kWh annuel, il faut donc une puissance installée 7 à 8 fois supérieure à celle nécessaire en thermique fossile ou nucléaire. Ceci avec un prix du MW installé déjà 3 fois plus cher.

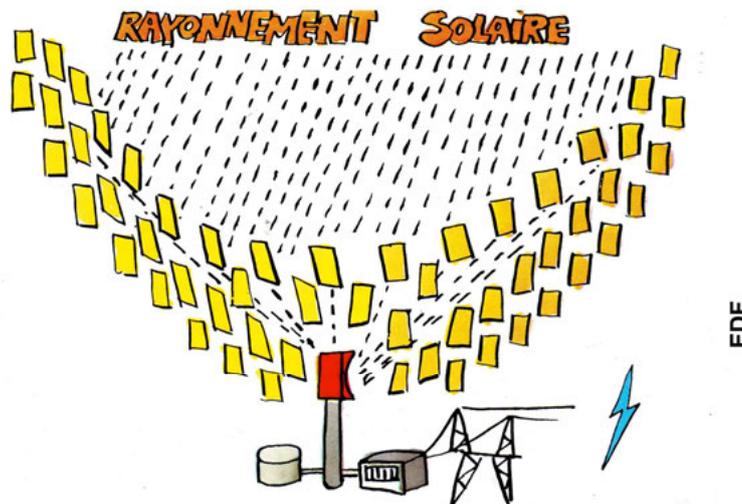
L'énergie solaire ne peut rester qu'un faible appoint de quelques % pour les réseaux nationaux. Il est significatif que les pays pétroliers du Golfe, pourtant riches et très ensoleillés, envisagent l'énergie nucléaire plutôt que le solaire pour relayer l'épuisement de leur pétrole dans quelques décennies.

La durée de vie des équipements serait de 20 ans au moins, sauf pour les cellules photovoltaïques qui perdent progressivement leur puissance.

Hydraulique : énergie diffuse, mais captée et concentrée par la nature



Ce que la nature n'a pas fait... l'homme doit le faire



Solaire : énergie diffuse à capturer et concentrer

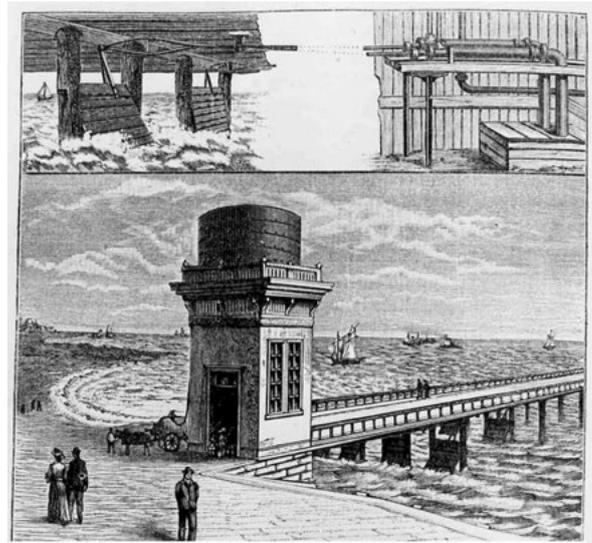
L'énergie des vagues est très impressionnante par sa puissance les jours de tempête, mais reste un objectif difficile. Sa transformation en électricité peut adopter plusieurs formes : Au XIXe siècle une dizaine de systèmes ont été projetés ou réalisés, par exemple faire osciller des volets qui transmettaient leur mouvement à des pompes d'élévation d'eau dans un réservoir (t). D'autres plus élaborés fabriquaient de l'air comprimé stockable. En 1975, la société norvégienne Kvaerner a essayé un ancien système de 1892 dans lequel l'air était comprimé par la colonne d'eau oscillant dans un tube ouvert à la partie inférieure dans la mer. Il fut détruit par une forte tempête, grand problème de toute installation en bord de mer. L'air comprimé est néanmoins un vecteur d'énergie stockable et transportable à de petites distances, pour un peu rentabiliser les énergies intermittentes. (t1)

D'autres solutions techniques pour capter l'énergie de la houle et la transformer en électricité sont en cours au Portugal et en Écosse. S'ils résistent mieux aux tempêtes que leurs prédécesseurs, leur production restera cependant très marginale.

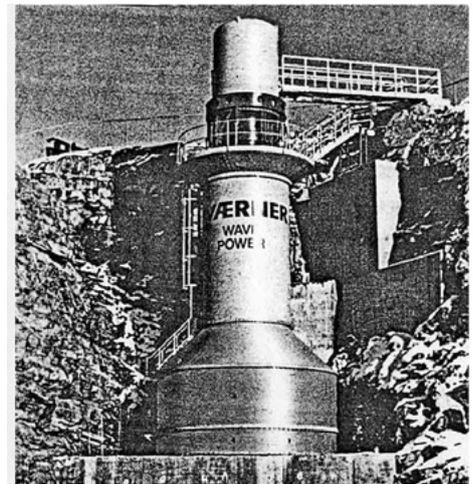
L'énergie des marées avait par contre été utilisée par des moulins de marée sur des côtes, comme celles de la Bretagne. Les estuaires des rivières forment là de longs réservoirs se remplissant et se vidant au rythme des marées.

Un petit barrage ferme l'estuaire pour créer une différence de niveau et accumuler ainsi de l'énergie potentielle récupérée pour faire tourner la roue hydraulique d'un moulin au remplissage et à la vidange du bassin à chaque marée. (t3) D'autres systèmes furent aussi imaginés.

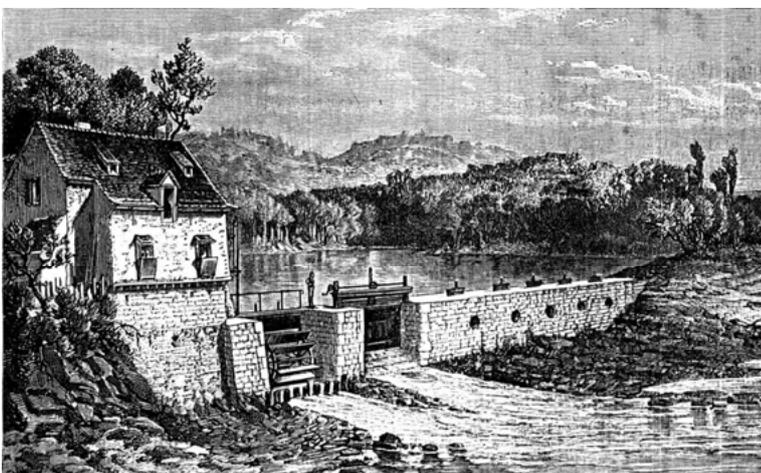
L'idée de remplacer l'ancien moulin de la Rance par un vaste système hydroélectrique remonte au début du XX^e siècle et l'usine marémotrice, première au monde, fut mise en service en 1966, apportant une puissance de 240 MW, seulement 25 % du temps, mais programmable. Ce projet nécessita l'invention d'un nouveau groupe turbine-alternateur pour basses chutes, le groupe bulbe créé par le constructeur Neyrpic de Grenoble (u). Il intègre dans la même enceinte immergée une turbine du type Kaplan, couplée avec l'alternateur et fonctionnant dans les deux sens, comme le conseillait déjà en 1737 l'hydraulicien Bélidor.



t Pompage de l'eau dans un réservoir - 1875
Utilisation de l'énergie des vagues



Système norvégien pour air comprimé-1975
t1 Utilisation de l'énergie des vagues



t3 Moulin de marées de la Rance

La production d'électricité est intermittente, mais prévisible et donc programmable comme une usine au fil de l'eau, une énergie de base, mais avec un facteur de charge de 25%, d'où une rentabilité faible et compte tenu d'un investissement important, le kWh est produit au prix élevé de 0,12 € soit environ 3 fois le prix du kWh nucléaire en sortie de centrale. La centrale de la Rance produit 0,08% de la production totale en France.

Le nombre de sites dans le monde où peut être établie une centrale marémotrice est très réduit. Dans différents

pays, une dizaine de projets ont été élaborés, mais compte tenu de leur très faible rentabilité, une seule autre centrale de petite puissance, 15 MW, a été construite, au Canada. Il y aurait en Corée du sud un projet en cours de réalisation d'une centrale équivalente à la Rance.

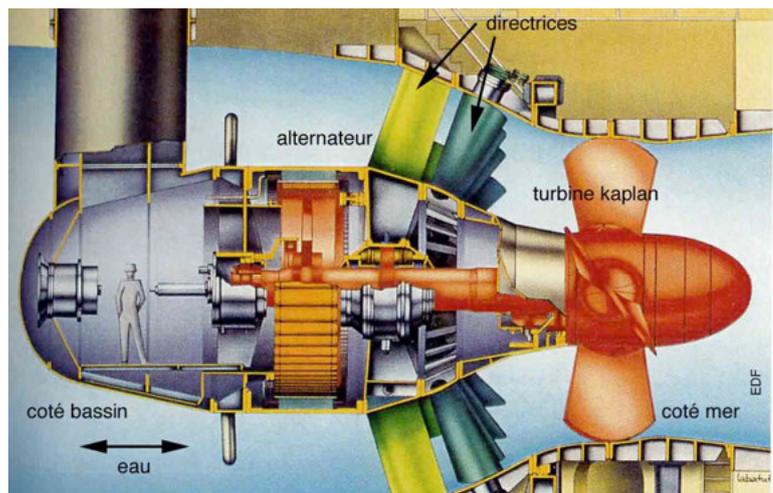
L'énergie des courants de marée

Ces courants sont parfois importants dans certaines configurations de côtes irrégulières. Aussi l'idée d'y faire tourner des hélices immergées couplées à un générateur, dénommées hydroliennes est envisagée.

C'est le principe des anciens moulins de rivière que l'on faisait flotter à poste fixe sur des cours d'eau. Les aubes entraînées par le courant mettaient en rotation un arbre, transmettant son énergie aux machines installées sur la rive. (v) Le système s'avérait bien moins puissant avec les roues hydrauliques en dessous pour les mêmes débit et vitesse de l'eau, que les roues hydrauliques terrestres en dessus, récupérant par gravité l'énergie potentielle résultant de la hauteur de chute amont-aval.

Il en est de même pour l'**hydrolienne** d'aujourd'hui, qui ne recueille qu'une faible partie de l'énergie cinétique du courant (v2).

Pour capter l'énergie du courant d'un fleuve, il s'avère beaucoup plus efficace d'élever le niveau amont par un barrage, même de faible hauteur, permettant d'actionner des turbines, que d'immerger simplement des hélices dans la totalité du courant simplement canalisé. Après des calculs, difficiles en mécanique des fluides avant l'ordinateur, les deux solutions avaient été testées comparativement en laboratoire par la société Neyrpic de Grenoble, pour la Rance et l'équipement du Rhône. Il en est résulté l'invention du groupe bulbe, à turbine Kaplan.

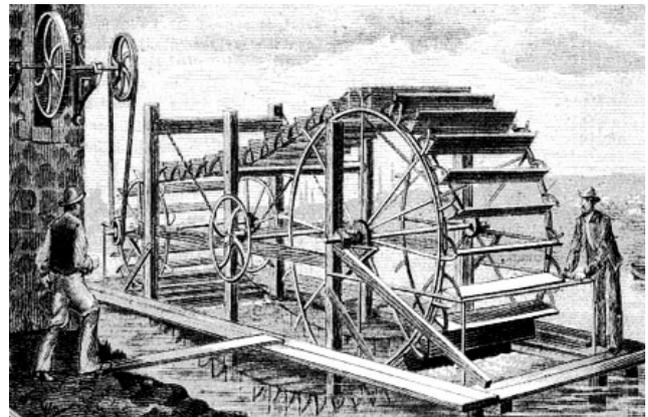


u

Groupe bulbe de la Rance

Ces courants sont parfois importants dans certaines configurations de côtes irrégulières. Aussi l'idée d'y faire tourner des hélices immergées couplées à un générateur, dénommées hydroliennes est envisagée.

C'est le principe des anciens moulins de rivière que l'on faisait flotter à poste fixe sur des cours d'eau. Les aubes entraînées par le courant mettaient en rotation un arbre, transmettant son énergie aux machines installées sur la rive. (v) Le système s'avérait bien moins puissant avec les roues hydrauliques en dessous pour les mêmes débit et vitesse de l'eau, que les roues hydrauliques terrestres en dessus, récupérant par gravité l'énergie potentielle résultant de la hauteur de chute amont-aval.



v

Moteur hydraulique de rivière - 1873



v2 Hydroliennes fluviales

Mais un barrage n'est pas réalisable en mer pour les courants de marée. Aussi, l'hydrolienne ne peut rester qu'un système de production marine très marginal et d'un coût élevé par kWh annuel produit ; il pourrait être envisagé sur le courant presque permanent des fleuves assez rapides. Comme l'expérience l'a montré pour l'énergie des vagues, la résistance aux tempêtes est le principal problème dont la force est trop souvent sous-estimée parce que rare. Il faudrait alors immerger les hydroliennes à au moins 2 à 3 fois la hauteur des plus grosses vagues, soit au moins 20 à 30 m. D'où difficultés pour l'entretien du générateur électrique noyé, et la prolifération des coquillages sur les aubes. Les coques de navires sont carénées, hors d'eau presque tous les ans.

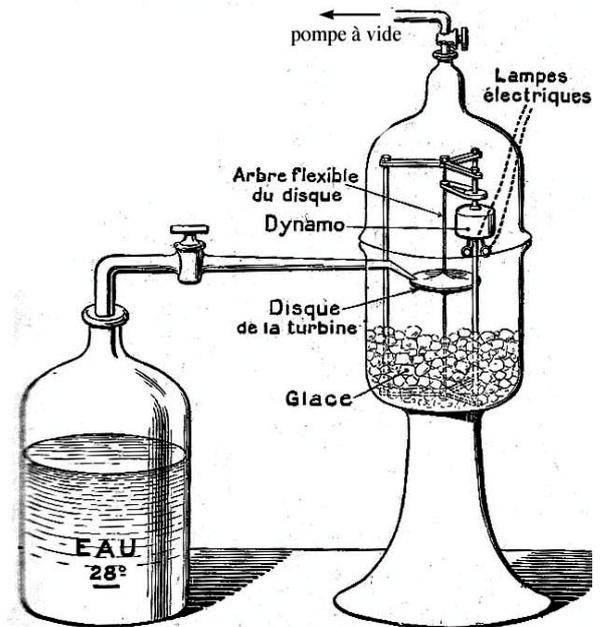
L'Énergie Thermique des Mers – ETM

Déjà, au début du xx^e siècle, on se préoccupait de l'épuisement possible du charbon très exploité, comme du pétrole en début d'exploitation, et l'on recherchait d'autres sources d'énergie. L'idée d'exploiter la différence de température de l'eau du sous-sol de Paris avait été proposée par d'Arsonval en 1881 pour faire fonctionner un moteur à vapeur. On l'attribue aussi par erreur à Jules Verne (15).

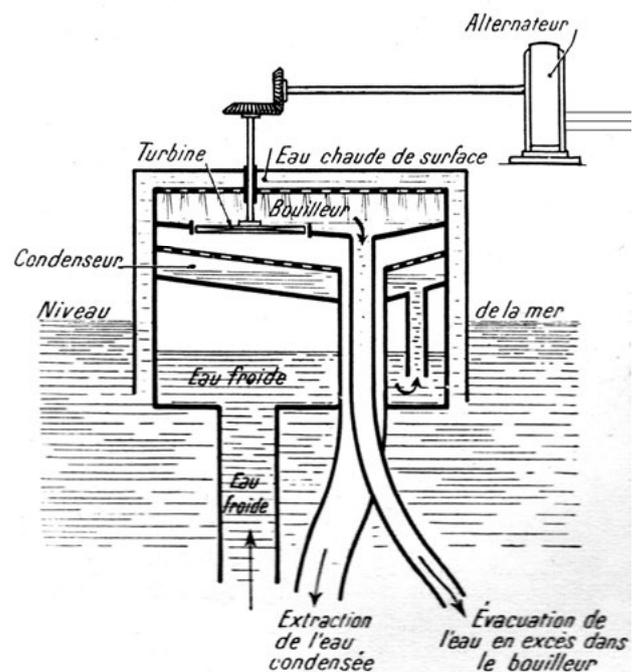
En 1926, deux ingénieurs français, Georges Claude, physicien, et Paul Boucherot, électricien, présentent à l'Académie un mémoire sur la possibilité de concevoir une usine à vapeur d'océan fournissant de l'énergie électrique à partir d'un moteur à vapeur fonctionnant classiquement avec le principe de Carnot. La source chaude serait l'eau de surface des Océans tropicaux à $27^{\circ} C$, et la source froide, l'eau remontée des profondeurs vers $10^{\circ} C$. Ils réalisent une petite expérience de démonstration du procédé (w). Lorsqu'on fait le vide dans l'appareil à droite, l'eau à 28° du flacon de gauche entre en ébullition, la vapeur va faire tourner la roue d'une turbine par refroidissement dans le condenseur à glace. Elle anime une dynamo miniature qui allume deux petites lampes.

La presse technique détaille alors les projets envisagés, l'usine électrique étant soit sur le rivage, soit de préférence une île artificielle un peu au large, pour éviter les inconvénients des marées et de la houle, l'électricité serait transmise par câble sous-marin (x).

Le procédé est validé dès 1928 par une première expérience prototype terrestre en Belgique, à Ougrée, où le système fonctionne entre l'eau chaude à 33° de refroidissement d'un haut-fourneau et l'eau froide à 12° de la Meuse. La puissance recueillie sur la dynamo couplée à la turbine atteint 59 kW, dont 40% sont utilisés par les auxiliaires. Ce rendement de 60% est un succès pour un premier essai.

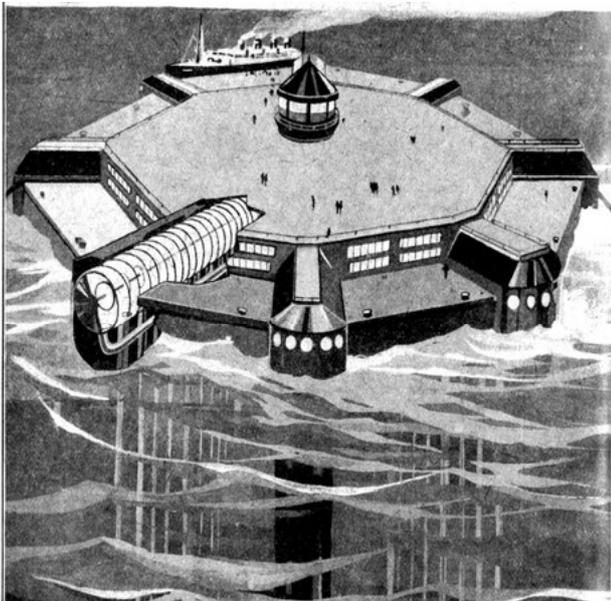


w Expérience de Claude et Boucherot - 1927



x Centrale ETM de G. Claude et P. Boucherot - 1926

Claude installe en 1930 cette machine à Cuba. De sérieuses difficultés surviennent pour l'installation de la conduite de 2 m de diamètre, longue de 2 km, qui doit puiser l'eau froide à 10° C, à 700 m de profondeur. À la mise en service, le résultat est encourageant, la machine produit 22 kW avec un débit d'eau de 200 l/s, l'eau froide étant à 13° C et l'eau chaude à 25° C. Cela permet d'envisager qu'avec un écart de 24° on pourrait atteindre 240 kW.



Y Projet de centrale ETM sur une île flottante - 1927

Le problème de l'usine flottante est envisagé pour éviter tous les problèmes complexes de mise à l'eau d'une très grosse et longue conduite. Ce sera en 1935 un navire récupéré, la Tunisie, qui sera cette île au large du Brésil, mais là encore diverses difficultés font abandonner le projet avant sa mise en service (y). Ce qui est remarquable dans ces différents essais, c'est l'obstination de Claude qui arrive à surmonter progressivement les obstacles, mais doit s'arrêter ne trouvant plus de financement. Un nouveau projet est amorcé à Abidjan en 1941 et arrêté par la guerre. Il aurait permis d'alimenter en électricité le projet de transsaharien, qui aurait évacué le fer de Mauritanie vers l'Algérie. Là le gaz permettait de le valoriser en une sorte d « éponge de fer » pour la sidérurgie. Après WW2, le procédé ZTM a été étudié et repris aux Etats-Unis, puis au Japon, mais sans nette conclusion.

L'ETM est un procédé techniquement validé, capable de générer en permanence une importante quantité d'énergie électrique de base, non intermittente, mais nécessite d'être conduit à grande échelle, nécessitant donc un investissement important. La principale difficulté technologique est la pose d'une énorme conduite immergée de 10 ou 15 m de diamètre, descendant à près de 1000 m, et surtout dont la partie supérieure doit résister aux vagues des tempêtes. L'expérience acquise avec les plateformes pétrolières offshore serait utile sur ce point.

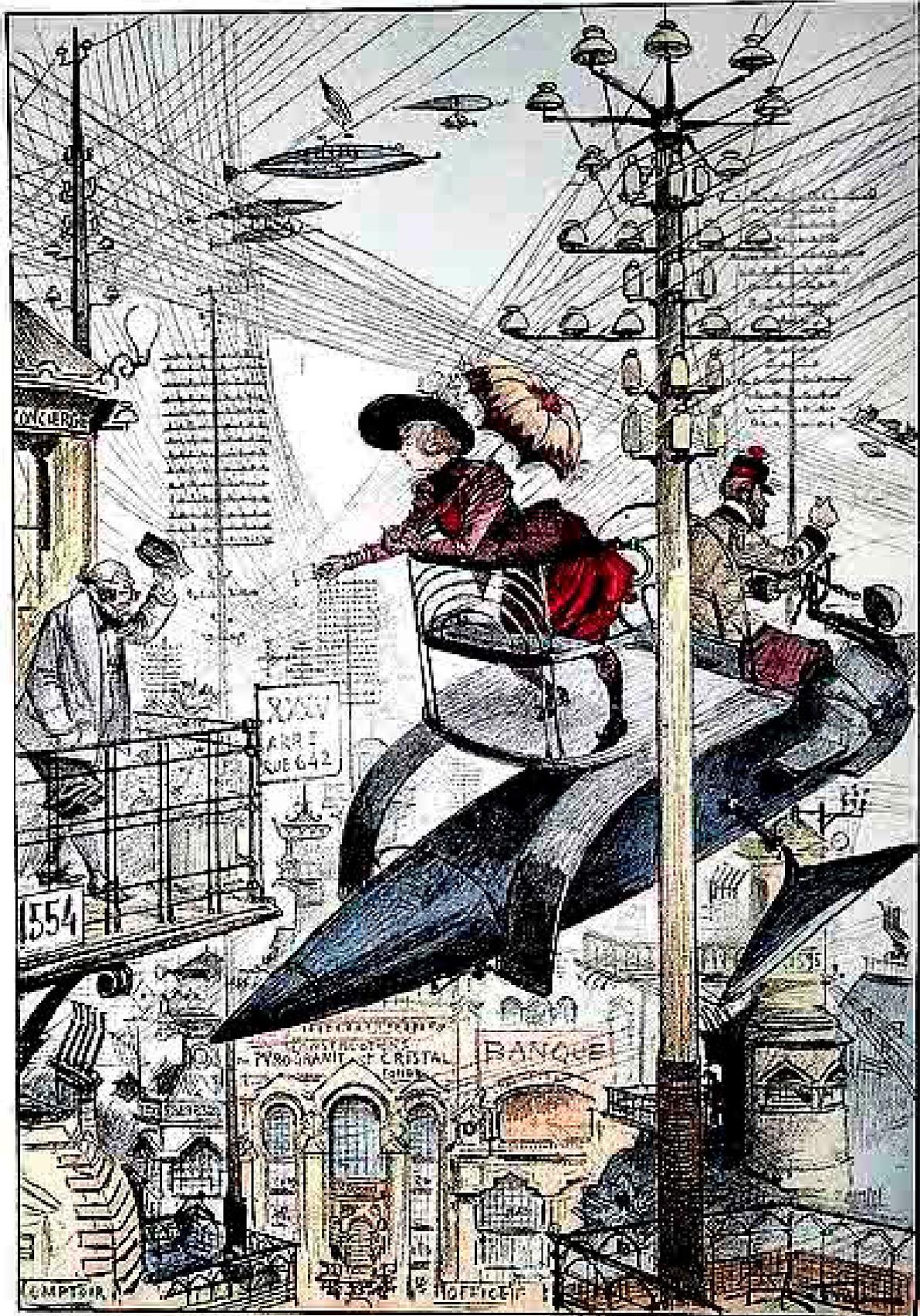
Son principe le limite aux mers tropicales, ce qui n'intéresse pas directement les pays du Nord, les plus capables techniquement et financièrement de le développer (16).

En résumé, sauf l'ETM, les divers procédés essayés pour générer de l'électricité à partir de l'énergie de la mer ne peuvent fournir des quantités au plus de l'ordre du pour cent, intermittente et nécessitant des investissements très loin de la rentabilité.

Coût de l'électricité avec différentes énergies

Il est assez difficile à cerner, il y a d'abord le coût de production, en sortie de centrale, composé de trois éléments, le combustible, le fonctionnement et l'amortissement du capital investi. Leur répartition est très variable. Le coût du combustible est nul pour les énergies naturelles, hydraulique, éolien, faible pour le nucléaire, élevé pour pétrole et gaz. Le coût réel est donc très variable pour la même centrale en fonction du temps de fonctionnement annuel.

Le coût financier est par contre élevé pour le nucléaire, très élevé pour l'éolien et le solaire surtout si l'on y intègre le coût des moyens pour pallier un peu l'intermittence aléatoire : centrales thermiques de substitution, dispositifs de stockage, réseaux intelligents.

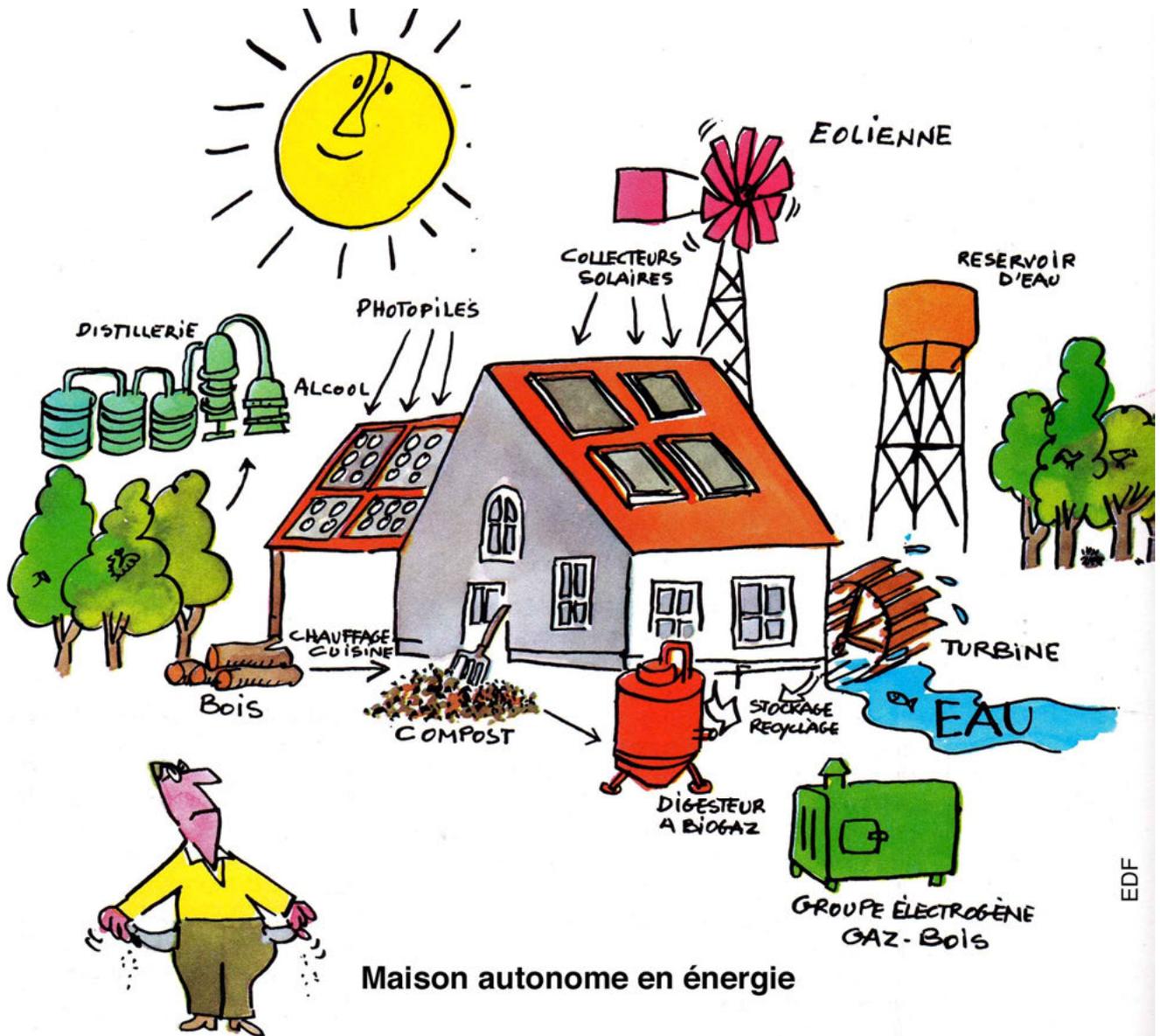


za

UN QUARTIER ENBROUILLE.

Le vingtième siècle - Albert Robida - 1883

A la fin du vingt et unième siècle



Fin du tome II

Pages 120 à 140 non reproduites