

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

Du même auteur

La mesure électrique au temps des pionniers
ed RGE -1990

Une histoire pour l'avenir - Merlin Gerin - 1920 -1992
(sous la direction de) ed. Albin Michel - 1992

La Houille blanche de Belledonne en Romanche
Aristide Bergès du mythe à la réalité
ed. de Belledonne - 1998

Histoires d'industries en Dauphiné
(collectif) ed. APHID - 2002

En couverture

Zénobe Gramme invente la dynamo industrielle-1872
Physique populaire, 1890

À Françoise.

À Quentin, Matthieu, Eugénie, Mélanie, Héloïse, Hugo,
pour les inciter à mieux comprendre, par son histoire,
leur futur métier, technique, commercial ou médical.

La jeunesse d'aujourd'hui ne respecte plus les maitres.
Ce manque de respect ne peut pas lui être reproché,
car, dans l'étude des sciences
on ne l'initie plus à l'histoire des découvertes.
H. de Parville -1872

Merci à Michel Serres et ceux qui l'accompagnent.
Ils m'ont révélé l'histoire des sciences,
cette autre culture, scientifique et technique, délaissée en France,
indispensable pour comprendre notre *âge électrique*.

Il n'y a de progrès humains
que si les efforts continus des générations s'additionnent.
La civilisation dont nous jouissons n'est que la somme
des résultats du labeur des siècles écoulés.
S. Smiles -1863

Sommaire

Tome I – Défricheurs de l'inconnu

Tome II – Générer l'électricité

Au lecteur	11
Produire l'électricité	13
1 – Générateurs électrochimiques	15
Piles hydroélectriques, utilisations. Pile à gaz. Accumulateur. Stocker l'énergie électrique, en direct, en indirect.	
2 – Générateurs statiques	25
Pile thermoélectrique. MHD. Générateur photo-électrique. Générateur piézo-électrique.	
3 – Générateurs électromécaniques	33
La machine de Pixii. Machines de Clarke, Alliance. Perfectionnements, Machine Gramme. Antériorités. Réversibilité. Machine Siemens. Dyamos en alternatif. Épilogue.	
4 – Bobine d'induction ou de Ruhmkorff	67
Bobine de Masson. Bobine de Ruhmkorff. Antériorités. Applications	
5 – Quelles énergies pour produire l'électricité ?	75
Sources d'énergie. Centrales thermiques à flamme, nucléaires. Énergies naturelles (EnR) : hydraulique, éolienne, biomasse, géothermique, solaire, marines. Coûts. Nouvelles conversions. Production mondiale.	
6 – Sources d'énergie électrique en France	121
La croissance 1890 –1945. L'après guerre. D'autres sources d'énergies. Débuts du nucléaire. L'électricité nationale devient européenne.	

Tome III – Et la lumière fut

Tome IV – Vecteur d'énergie

Tome V – Vecteur d'information

Le sommaire général des 5 tomes figure en fin de livre.

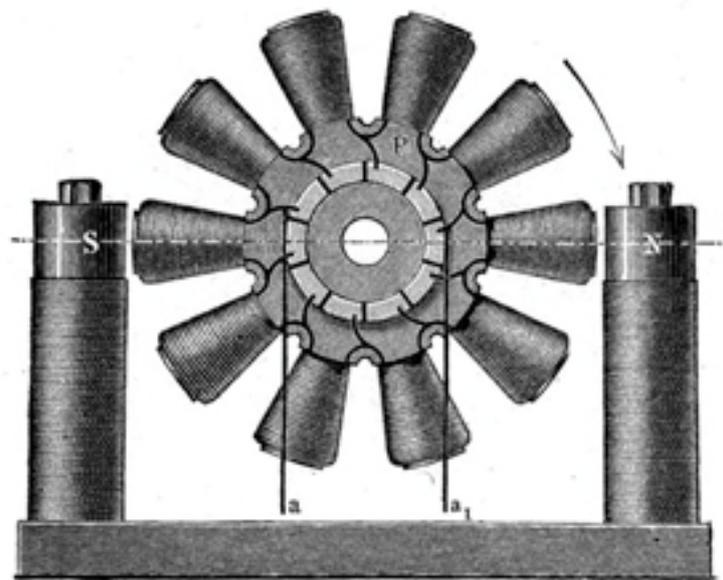
Renvois dans le texte :

(k) = voir figure repère k

(5) = voir complément 5 en fin de chapitre

(II-4) = voir tome II, chapitre 4

(II-4) = voir tome II, chapitre 4



Au lecteur

Ce livre, genèse des découvertes et des inventions, constitue peut-être une vingt sixième Histoire de l'électricité depuis la première, celle de Joseph Priestley en 1771.

Alors, qu'apporte-t-il d'autre par rapport aux précédents ?

Comprendre le pourquoi et le comment de l'émergence de l'une des sciences physiques, l'électricité, et des techniques qui l'ont mise au service de l'homme par l'industrie, tel est l'objectif central de cette histoire.

Il retrace l'étonnante aventure intellectuelle et matérielle des pionniers, découvreurs et inventeurs de Thalès au transistor. Les premiers cherchaient à soulever un coin du voile cachant cet univers infini des connaissances, les seconds s'appliquaient à les traduire pratiquement en machines et objets utiles, souvent par passion, ou pour gagner leur vie, en facilitant celle de leurs contemporains.

Cette ambition m'a conduit à ne pas rééditer une histoire limitée à un catalogue chronologique de faits, dates, événements, personnages et machines. Elle ne se propose pas de s'ajouter à d'autres histoires essentiellement descriptives, mais d'en être complémentaire sur deux aspects :

D'abord, approfondir l'histoire des longs et laborieux processus qui ont déclenché chacune des découvertes et inventions de l'électricité ; analyser avant leurs causes, puis après leurs conséquences, pour mieux en percevoir l'originalité et le mystère - des exemples pour le chercheur d'aujourd'hui.

Ensuite, après le début du développement industriel des inventions, survoler seulement leurs perfectionnements successifs, mieux connus car plus proches de nous et déjà bien décrits.

Finalement, il en résulte une histoire de l'électricité analytique, non simplement descriptive.

Avant de relater chaque découverte ou invention, il faut rechercher ses raisons et les difficultés latentes, humer *l'air du temps* ; essayer de dégager ensuite *le fil rouge*, la démarche incertaine ou rapide qu'avaient suivi leurs auteurs. Une telle analyse permet au lecteur d'intégrer à sa place chacune de ces briques éparses, dans la construction progressive, mais désordonnée et sans logique apparente, du système électrique global. La forêt est autre chose qu'une somme d'arbres.

Comprendre une invention nécessite de l'analyser bien au-delà de l'angle scientifique ou technique. Tout y intervient, la formation et l'expérience des hommes, leur mentalité, méthodologie, motivations et environnement ; Sans oublier les aspects commerciaux, financiers et même nationaux, transformant parfois l'invention en un véritable thriller.

La finalité de l'histoire des sciences et techniques est d'essayer de comprendre ce cheminement intellectuel qui a conduit le cerveau du découvreur ou de l'inventeur jusqu'à l'éclosion de sa recherche, une passionnante aventure de l'intelligence humaine, quels que soient l'époque et les moyens, comme le précisait le philosophe Heidegger :

L'essence de la technique n'est rien de technique,

c'est le fonctionnement mystérieux du cerveau humain.

André Ducluzaux 2011

Suite de l'avant-propos, voir tome I

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.



salle des piles au bureau central des télégraphes



1 – Générateurs électrochimiques

Depuis la découverte de Volta en 1800, l'électricité pour les expériences de laboratoire était générée par des piles, résultant de la transformation d'énergie chimique, provenant de la transformation d'un métal, généralement le zinc. Un couple fournissait au mieux quelques ampères sous un volt environ. Par mise en série des couples, on pouvait atteindre une centaine de volts.

Son amélioration occupa beaucoup de monde pendant des années, d'où une multiplicité de modèles désignés par le nom de leur inventeur, qui n'avait apporté le plus souvent qu'un petit perfectionnement. On dénombre 73 types de piles dans le dictionnaire d'Électricité de 1889. Il faut en ajouter des dizaines depuis.

Piles hydroélectriques

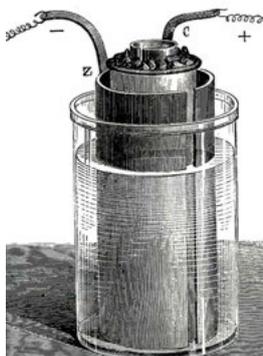
C'est le nom que l'on donnait aux piles à deux électrodes et électrolyte aqueux, les plus classiques. Plus tard elles sont devenues sèches, basées sur le même principe !

Dans la pile Volta à colonne, le feutre se desséchait vite, ou son liquide coulait. Cruikshank disposa alors la pile horizontalement, dans une boîte séparée en petits casiers, la pile à auges.

Wollaston augmenta la surface de l'électrode en cuivre en entourant celle de zinc. La batterie (a) rassemble cinq couples ; les anodes en zinc sont reliées à une traverse qu'on peut suspendre au-dessus de la caisse lorsque la pile ne fonctionne pas, ceci pour éviter l'altération permanente du métal.



À la Royal Society, Davy disposait d'une grande pile de 2000 couples capable de donner une dizaine d'ampères sous une centaine de volts, gigantisme inutile pour les utilisations de l'époque. Les chimistes français, craignant d'être distancé par les Anglais, obtinrent de Bonaparte une pile de 600 couples à l'école Polytechnique. Elle n'apporta guère de découverte importante. (1)



Pile Daniell

Mais pendant une trentaine d'années, les chimistes n'arrivaient pas à supprimer ce défaut majeur de la pile, la polarisation, qui la rendait assez rapidement inopérante.

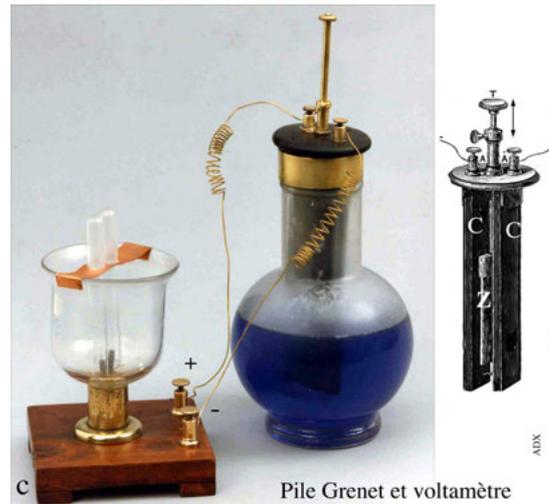
Ce phénomène résultait du dépôt d'éléments de la réaction chimique sur les électrodes, comme les bulles d'hydrogène sur le cuivre positif.

Une pile impolarisable fut construite par Antoine Becquerel (2) en 1829 en séparant les deux électrodes par une cloison poreuse, chaque côté étant rempli par un électrolyte différent, c'était la pile à deux liquides. Le zinc était dans un morceau d'intestin de bœuf. L'Anglais John Daniell l'améliora en 1836 en remplaçant l'intestin par un vase poreux. On obtenait un courant assez constant pendant quelques heures (b).

Johann Poggendorf trouve en 1842 une autre solution avec un seul liquide, le bichromate de potasse associé à l'acide sulfurique.

Grenet lui donne en 1850 la forme pratique d'une pile bouteille dans laquelle on descend l'électrode en zinc entre les deux plaques en charbon constituant l'autre électrode. Cela permettait, lorsque la pile n'est pas utilisée, de relever la tige de l'électrode de zinc pour éviter qu'elle se dégrade.

Malgré cet inconvénient, cette pile sera très utilisée pour des usages temporaires et dans les laboratoires. Sa tension élevée de 1,8 V donnait un débit de courant appréciable ; par exemple l'alimentation d'un voltamètre sur la photo (c).



La photo (d) illustre un gadget rare, le premier briquet électrique vers 1875. Le vase principal est une pile Grenet au bichromate dont la tige portant le zinc est normalement relevé par un ressort. À côté le petit vase contient de l'esprit-de-vin, de l'alcool, ou de l'essence de pétrole dans lequel trempe une mèche normalement couverte par un capuchon. Lorsque l'on appuie sur la tige, le capuchon est soulevé, l'électrode en zinc descend et le courant de la pile chauffe une petite spirale de platine, au-dessus de la mèche imbibée d'alcool, laquelle s'enflamme par effet thermique et catalytique du platine. C'était plus moderne d'allumer sa pipe ainsi, plutôt qu'avec une allumette.

Une autre voie, les piles à dépoliarisation, sera explorée en 1838 par le juriste et physicien anglais William Grove. Elle nécessitait de l'acide nitrique et des électrodes en platine. Très appréciée chez les télégraphistes pour ses bonnes caractéristiques, 1,8 V et 10 A. Elle fut abandonnée en raison de ses vapeurs nitriques et du coût du platine.

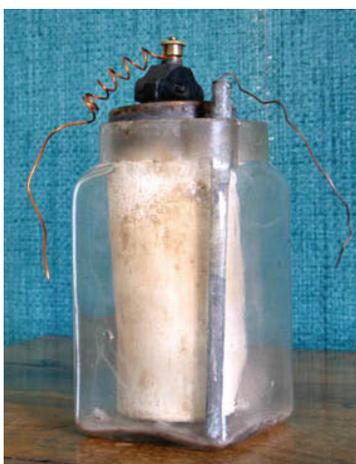
Un chimiste d'Heidelberg, Wilhelm Bunsen, l'améliora en remplaçant le platine par du charbon, mais elle perdait de la puissance.

La solution définitive pour la dépoliarisation fut apportée par Georges Leclanché, ingénieur aux Chemins de fer de l'Est, qui ne trouvait pas de piles satisfaisantes pour ses transmissions d'information à distance. Après un premier essai avec le carbonate de cuivre, il

constitue la cathode avec un dépoliarisant solide de charbon aggloméré avec du dioxyde de manganèse (e). L'électrolyte était salin, du chlorure d'ammonium et l'anode une simple tige en zinc.

Le brevet fut déposé en 1867, la fabrication démarre en Belgique ; en 1871, 80 000 piles fonctionnaient pour les télégraphes des chemins de fer belges.

Plus tard, en 1883, l'électrolyte a été solidifié avec du plâtre ou autres produits. La pile sèche saline était née (f). La variante alcaline n'apparut qu'en 1959 chez Union Carbide.



Peut-être faut-il aussi ajouter aux nombreuses piles inventées, celles au sodium, deux fois plus énergiques que la pile Bunsen, inventées par le capitaine Nemo pour fournir l'énergie propulsive au sous-marin Nautilus. Le sodium inépuisable était extrait de l'eau de mer par un procédé secret non révélé par Jules Verne, dans une usine cachée au fond de l'océan, fonctionnant avec les houilles sous-marines.

Applications de la pile

Malgré quelques inconvénients, dont sa durée de vie limitée, la pile fut le générateur électrique bien adapté à la première grande utilisation de l'électricité, le télégraphe, suivi du téléphone. Même après l'arrivée vers 1880 des générateurs électromécaniques puissants pour l'éclairage, les deux systèmes de production n'étaient pas concurrents, mais complémentaires.

Pendant la première moitié du xx^e , le téléphone manuel fonctionnait encore avec une pile chez l'utilisateur, avant la diffusion progressive de l'automatique. Les piles sèches, type Leclanché, étaient utilisées pour l'éclairage de secours, la lampe de poche. Les anciens se souviennent du slogan de cette marque très répandue : « la pile Wonder ne s'use que si l'on s'en sert » (g).

La pile n'était plus alors qu'un petit générateur autonome de secours marginal. Après 1950, le marché des piles s'est envolé avec l'invention du transistor, élément clef du poste-radio portable et tous les nouveaux systèmes électroniques à semi-conducteurs, ne nécessitant plus que quelques volts en courant continu, parfaitement adaptés à la pile (3). Actuellement le total des piles utilisées en France chaque année représente 25 000 tonnes. Elles produisent 4 millions de kWh, soit 4 GWh, près de un cent millième de l'énergie totale produite.

À côté de la pile, jetable après usage, sont apparus des petits accus, rechargeables, qu'un usage regrettable dénomme à tort pile rechargeable.

La pile à gaz (dite à combustible)

Faraday avait constaté que lorsque déconnectait un voltamètre de sa pile, les volumes d'hydrogène et d'oxygène enfermés dans chaque tube, après dissociation de l'eau, disparaissaient lentement.

En 1839 Grove fit la même constatation et chercha à amplifier le phénomène. Son croquis (h) montre 4 couples de tubes remplis d'oxygène et d'hydrogène, munis d'électrodes de platine et immergés dans une solution d'acide sulfurique. Ils produisent de l'eau et un courant circulant dans le voltamètre supérieur, lequel décompose l'eau en H et O. Étonnante réversibilité du phénomène, mais avec quelques pertes.

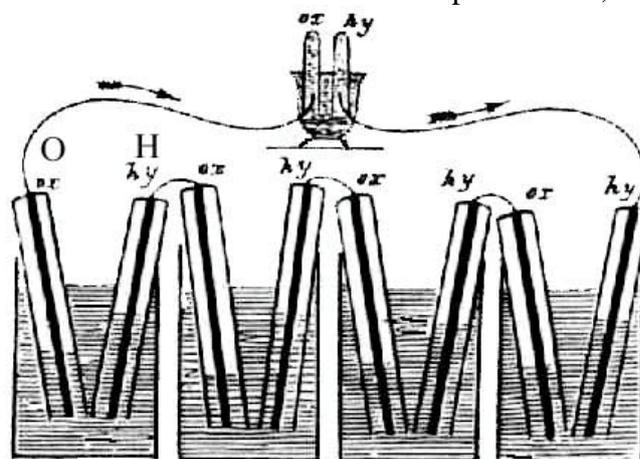
Ce voltamètre réversible est resté longtemps une simple curiosité, sous le nom de pile à gaz (j).

En 1889 son nom anglais, gaz Battery fut changé en fuel cell par analogie avec les essais des chercheurs Mond et Lander qui tentaient faire fonctionner un dispositif semblable utilisant l'air et du gaz de ville, obtenu par distillation du charbon. Traduit en français, cela a donné pile à combustible, désignation impropre, moins compréhensible que celle de pile à gaz.



g

collect FVB



h

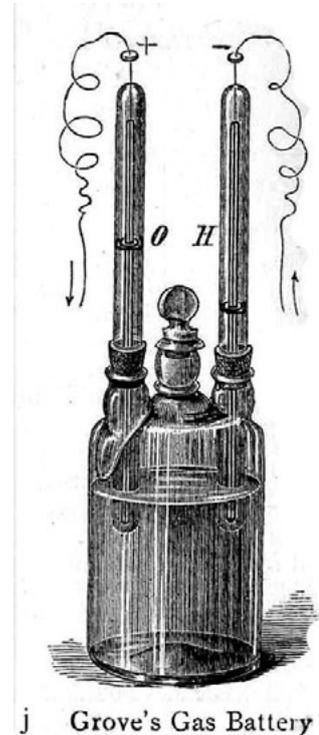
Voltamètres réversibles de Grove

Ensuite le dispositif est resté dans l'oubli jusqu'aux travaux de l'Anglais Francis T. Bacon qui construisit en 1959 une pile de 5 kW.

En 1960, les engins spatiaux Gemini et Apollo utilisaient ce générateur embarqué, mais Apollo 13 a failli ne pas revenir suite à une panne d'électricité, et une autre capsule a brûlé au sol avec son équipage, probablement suite à une fuite d'hydrogène, gaz très inflammable. Depuis, la NASA préfère les panneaux solaires.

En France, l'organisme public D.G.R.S.T. subventionna en 1965 un programme de recherches sur ce thème, qui n'arriva pas à résoudre l'un des verrous, se passer du catalyseur platine, rare et très cher. La production mondiale en est de moins de 100 tonnes, dont une part importante est déjà absorbée par les pots catalytiques de voiture.

À partir de 1990, un nouveau regain d'intérêt pour la voiture électrique se heurtait au problème oublié du rapport de performance énergie/masse trop faible des accumulateurs classiques, permettant au mieux 100 Km à 60 Km/h. La pile à combustible apparaissait comme une solution pour constituer un bon générateur autonome d'électricité, si elle était industrialisable à un coût acceptable. Mais s'y ajoutaient les difficiles problèmes de la production d'hydrogène (non polluante en CO₂), de son stockage et sa distribution. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, ce n'est qu'un vecteur intermédiaire d'énergie. En produisant l'hydrogène par électrolyse, puis l'utilisant dans une pile à combustible, les deux rendements sont tels qu'on ne récupère en électricité guère plus de 25 à 30% de l'énergie. D'autres voies sont possibles, le reformage d'un hydrocarbure, ou mieux, pour des piles stationnaires, le gaz, toutes deux énergies à épuisement proche et dégageant du CO₂.



Depuis des milliers de chercheurs dans le monde travaillent sur le sujet, bénéficiant de budgets importants, En 2006, malgré l'exploration simultanée d'une dizaine de filières dans différents pays, aucune ne s'est encore révélée vraiment industrialisable en série à un coût acceptable pour l'automobile. Ce ne serait pas avant 8 ou 10 ans, délai généralement annoncé par un chercheur lorsqu'il considère qu'un procédé peut aboutir, dont il n'a pas la solution, mais estime qu'un autre pourrait la trouver (4).

En recherche-développement, on oublie trop souvent que par une sorte de loi fatale, plus un grand nombre de chercheurs ont travaillé sur un sujet, depuis des dizaines d'années, plus la probabilité d'arriver à un produit au point, techniquement et économiquement, s'amenuise...sauf nouvelle invention imprévue.

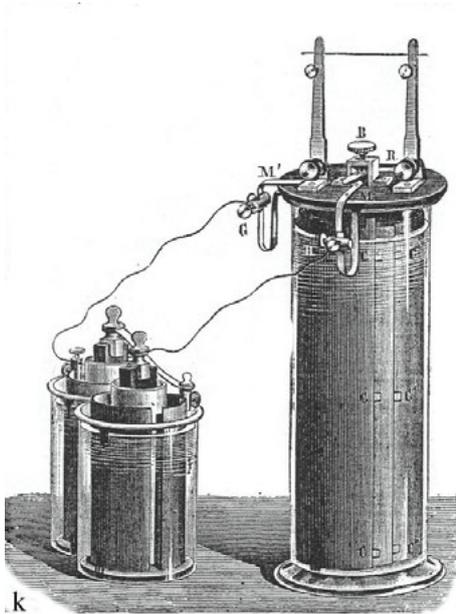
L'accumulateur

Dès 1801, Gautherot puis Ritter en 1802 ainsi que Becquerel avaient remarqué que les premiers voltamètres pour décomposer l'eau, se bloquaient progressivement par polarisation comme les piles. Si on reliait alors les deux bornes, un léger courant inverse se manifestait dans la liaison. Auguste de La Rive, en 1826, chercha la cause de ce courant dit secondaire ou courant de polarisation. Il fut suivi par d'autres savants. Mais alors que chacun tentait de l'atténuer, Gaston Planté eut l'idée inverse, il chercha à l'augmenter pour accumuler dans une pile secondaire l'énergie d'une pile normale.

Exploiter un inconvénient pour lui chercher une application avantageuse est parfois une idée fructueuse, dans son cas ce fut une idée de génie, une réussite qu'on peine encore aujourd'hui à perfectionner.

Ses premières recherches, publiées en 1859 et 1860, avaient consisté à trouver parmi plus d'une dizaine de métaux et divers électrolytes les plus aptes à permettre cette accumulation. L'effet maximum était obtenu par des électrodes en plomb dans une solution d'acide sulfurique. Lors de la charge à partir d'une pile, l'électrode positive se recouvrait alors d'une couche de peroxyde de plomb qui subsistait, étant insoluble dans la solution.

Planté analysa avec pertinence les diverses réactions chimiques complexes se produisant dans sa pile secondaire, en particulier le phénomène important de formation de la plaque de plomb au cours des charges et décharges successives.



k accumulateur Planté chargé par 2 piles

Son accumulateur, tel qu'il le dénomma, avait des caractéristiques électriques notablement supérieures à celle des piles : la tension d'un couple était d'au moins 1,5 volt, le courant débité presque constant pendant la décharge, l'intensité en était très élevée, capable de fondre des fils métalliques. Le rendement était excellent, près de 90% de l'énergie absorbée à la charge était restitué à la décharge (5).

Pour le réaliser, la première solution fut d'enrouler ensemble, en spirale, les deux électrodes (k).

Jusqu'en 1880, l'intérêt de l'accumulateur restait assez restreint, mais les génératrices puissantes commençaient à alimenter les premières installations d'éclairage en courant continu. L'accumulateur devint alors un auxiliaire important pour assurer la fourniture d'énergie au moment des pointes ; de mêmes pour les véhicules autonomes, non raccordés à un réseau électrique.

D'autres ont progressivement amélioré la fabrication et simultanément les performances de l'accumulateur au plomb. Ainsi, Camille Faure connut en 1881 un grand succès, passablement amplifié par la presse, en tapissant les lames de plomb avec de l'oxyde de plomb.

En Amérique, au début du ^{xx}^e, le célèbre Edison étudia de multiples couples métalliques pour améliorer les performances massiques de l'accumulateur au plomb, pour son ami Henri Ford, intéressé par un retour à la voiture électrique, supplantée par la voiture à pétrole à partir de 1905.

Il voulut breveter l'accumulateur nickel-fer en février 1901, mais le Suédois Waldemar Jungner avait déposé le même brevet deux semaines plus tôt. Au procès en Allemagne, Edison gagna grâce à son commando de juristes, mais le système ne fut guère exploité car Jungner breveta ensuite le nickel-cadmium, supérieur au précédent et encore utilisé aujourd'hui. L'électrolyte est alcalin, soude ou potasse. Il a des avantages sur l'accu au plomb, essentiellement son poids et une robustesse pour des véhicules électriques autonomes, mais une tension d'un volt par élément et un coût plus élevé.

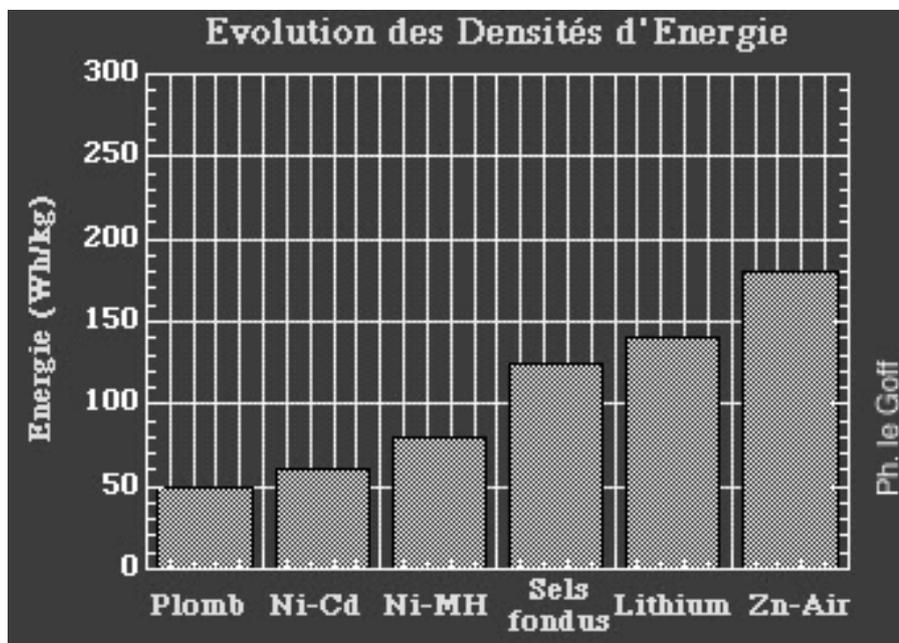


Il est assez étonnant que tous les perfectionnements apportés depuis plus d'un siècle à l'accu au plomb, toujours présent dans deux milliards de véhicules (1), ont à peine doublé sa capacité d'accumulation en Wh par kg de poids, 40 Wh/kg aujourd'hui. La plupart des autres machines électriques ont multiplié par cinq à dix leurs performances en un siècle.

Pour les petits accumulateurs des milliards d'appareils électroniques et informatiques actuels, le Ni-Cd a été remplacé vers 1988 par le Ni-MH (métal Hydrure) moins polluant et 30% plus performant. Depuis 1990, la nouvelle filière au lithium-ion s'avère beaucoup plus performante encore, elle atteint 100 à 200 Wh par kg, avec une tension triple de 3,6 V. Son coût élevé n'est pas un problème pour les petites puissances, le téléphone portable, mais un fort handicap pour la voiture électrique.

Une autre voie, le lithium métal polymère est exploré. Se posera aussi le problème des ressources en lithium. Les anciens déserts salins d'Amérique du Sud en sont très riches, en particulier la Bolivie, mais pour combien de temps, si quelques dizaines de millions de voitures électriques vont circuler ? Le recyclage du lithium est-il accessible ? (m)

D'autres pistes sont explorées, telle la batterie sodium-soufre qui permettrait de stocker à 300 °C trois fois plus d'énergie que l'accumulateur nickel-cadmium. Ce serait un pas vers une capacité de stockage fixe plus importante que la batterie électrochimique, mais loin de celle dont on rêve pour lisser les pointes des réseaux.



Accumuler cette énergie électrique instockable, mais indirectement sous une autre forme, électrochimique par exemple est aujourd'hui un objectif primordial pour la locomotion terrestre autonome, encore mal résolu, malgré d'importants efforts financiers. De plus, les espoirs que suscitent les énergies renouvelables, éolienne et solaire nécessitent impérativement un stockage bien plus puissant en quantité que les possibilités très limitées des accumulateurs électrochimiques.

Stocker l'énergie électrique

Toute forme d'énergie doit se stocker pour pouvoir en disposer en quantité variable suivant les besoins. C'est un fort handicap pour l'électricité.

En direct, sous forme de courant ou tension électrique.

Trop de nos contemporains ne réalisent pas que nos grands réseaux électriques ne sont pas des réservoirs d'électricité fonctionnant comme des réservoirs d'eau. À chaque fraction de seconde, l'électricité consommée par des milliards d'utilisations, en quantité fluctuante, doit être générée instantanément par des centaines de générateurs, ou cesser instantanément, sinon les caractéristiques d'équilibre des réseaux, tension et fréquence se dégradent jusqu'au brutal black-out.

Les électriciens ont progressivement compris dans la deuxième moitié du XIX^e le rôle essentiel, souvent gênant, de l'accumulation d'énergie dans les deux éléments de tous circuits, l'inductance et la capacité. Mais peut-on compter sur cette propriété pour y accumuler de l'électricité d'une façon pratique et en quantité ?

– En courant alternatif, le stockage est impossible, condensateurs et inductances propres des conducteurs échangent à la fréquence du réseau leur énergie fugitive. Phénomène à l'origine de la circulation d'une énergie dite réactive, posant par ailleurs des problèmes aux concepteurs de réseaux.

– En courant et tension continue, l'énergie électrique se stocke dans les inductances et capacités naturelles des conducteurs, mais mieux dans des récepteurs spécifiques, bobines d'inductance et condensateurs.

Dans une inductance de valeur L , l'énergie accumulée $1/2 LI^2$, est fonction du courant I qui la traverse. Physiquement, ce stockage ne se situe pas dans le bobinage proprement dit, mais dans le milieu qui entoure l'inductance, en fonction de sa propre perméabilité. Ainsi la présence de fer autour de l'inductance accroît fortement l'accumulation de l'énergie.

Nous verrons que ce stockage est souvent un inconvénient parfois très sérieux. Dans un but utilitaire, ce ne pourrait être qu'un stockage de durée limitée, compte tenu des pertes dans la résistance du circuit inductif. Et si l'on annulait ces pertes en utilisant un circuit sans résistance, supraconducteur ? C'est possible, mais encore très onéreux, car le supraconducteur doit être refroidi en permanence à -260 °C avec de l'hélium liquide, consommant beaucoup d'énergie.

Un essai a été fait aux USA en 1984 ; une grande boucle enterrée de spires supraconductrices a permis de stocker une énergie de 30 Mjoule (6). Ce stockage d'énergie se faisant obligatoirement en courant continu, les deux conversions nécessaires alternatif-continu-alternatif sont possibles avec les semi-conducteurs de puissance, mais coûteuses. La faisabilité du procédé a été démontrée, mais son application doit attendre que l'on découvre un supraconducteur à température moins basse, l'idéal serait la température de l'azote liquide, -196 °C , car le prix du litre d'azote liquide est inférieur à celui d'une eau minérale. Ce n'est qu'un sous-produit sans valeur de la liquéfaction de l'air, pour obtenir l'oxygène et les gaz rares.

Dans un condensateur de capacité C , l'énergie accumulée est $1/2 CU^2$. Les condensateurs classiques, avec une feuille mince séparant les deux armatures ne peuvent avoir une forte capacité surtout haute tension, l'épaisseur du diélectrique séparant les deux plaques étant nécessairement plus épaisses. Dans le condensateur, l'énergie est stockée dans le diélectrique. Les condensateurs de forte capacité sont du type électrolytique ou électrochimique, mais limités à la basse tension, 500 volts au plus (7).

Récemment sont apparus les supercondensateurs, composants de faible tension unitaire, 2,5 volts, mais dont la capacité et le courant de décharge sont très élevés. Parmi les applications envisagées figure une assistance à la voiture électrique, ou pour couvrir les pointes brèves.

En indirect

Le stockage d'énergie électrique en quantité peut se faire sous deux formes indirectes :

– En amont de sa production, sous forme d'énergie primaire : charbon, fuel, gaz et eau des barrages, uranium, plutonium. Les énergies électriques issues du soleil ou du vent que l'on redécouvre actuellement sont malheureusement instockable directement. La lumière du soleil et le vent ne se stockent pas comme pas comme l'eau de l'hydraulique. Handicap d'autant plus pénalisant qu'elles sont trop diffuses, intermittentes et aléatoires. (II-5)

– En aval de sa production, en convertissant l'électricité sous une autre forme réversible et économique, avec un rendement acceptable à chaque conversion :

- soit chimique (accus, hydrogène) en quantité réduite ;
- soit hydraulique (pompage), limitée aux sites montagneux ;

– soit pneumatique, l'air comprimé était une solution appliquée au XIX^e, et sera probablement reprise, mais limitée en quantité et rendement (40%), avec stockage souterrain comme le gaz ou dans les anciennes mines ;

– soit sous forme de chaleur comme dans les premiers tramways, à eau chaude sous pression (IV-5), mais avec un mauvais rendement de réversibilité ;

– soit sous forme d'énergie cinétique d'une masse importante mise en rotation à grande vitesse, mais ce procédé compliqué a été essayé au début du siècle précédent en Suisse, sur des autobus et s'avère très insuffisant en quantité.

– soit encore transformer l'électricité en hydrogène par électrolyse, ce qui impose une forte perte d'énergie, environ 30 à 40% si elle est effectuée à froid, moins si elle est opérée à chaud. Une autre solution serait, comme l'avait fait Lavoisier pour la première fois en 1775, de porter l'eau à 800°C, où elle se décompose, et que pourraient réaliser de futurs réacteurs nucléaires à haute température. Ensuite il faut stocker l'hydrogène gazeux par compression à plus de 500 bars, d'où consommation d'énergie, dans des réservoirs très solides et surtout étanches, car sa légèreté le fait fuir facilement à chaque jonction. Cet hydrogène est finalement retransformé en électricité par une pile à combustible ou un groupe alternateur entraîné par un moteur thermique à hydrogène. En dehors du coût d'investissement, le rendement global est probablement faible, d'environ 30%, ce qui le limite à des stockages de quantités assez réduites, par exemple pour concurrencer l'accumulateur dans le transport terrestre autonome.

Le stockage indirect de l'énergie électrique en quantité, sur lequel nombre d'ingénieurs ont travaillé depuis un siècle, sans succès notable, reste l'un des grands problèmes sans encore de solution pratique généralisable, en quantité, durée, rendement et coût acceptables pour les réseaux. La pénurie énergétique inéluctable du XXI^e siècle en aurait grand besoin, aussi des recherches sont à nouveau entreprises, mais aucune piste nouvelle n'est encore apparue, seulement des améliorations insuffisantes des solutions connues.

Ce problème, incontournable pour les énergies intermittentes, éoliennes et solaires est précisé au chapitre 5 ci-après.

Il faut souligner une leçon de l'histoire des techniques : Avant de démarrer une recherche sur tout sujet qui a déjà fait l'objet de recherches précédentes, sans succès, il faut bien analyser si l'un des paramètres, technique ou économique, du processus envisagé a nettement changé, suite à une innovation ou une évolution économique. Par exemple, pour l'accumulation par stockage d'énergie cinétique de rotation, expérimenté depuis 100 ans, il faudrait que soit apparu un matériau au moins 10 fois plus dense que le plus lourd aujourd'hui, l'uranium naturel. Sinon c'est plus sûr d'investir l'argent dans les casinos.

Compléments

0 - Une énumération exhaustive des piles figure dans quelques documents et livres de toutes époques. Un bon résumé figure dans l'URL, Raconte-moi la radio : dspt.perso.sfr.fr

1 - Après avoir coupé la tête de Lavoisier, la révolution découvrit que la République manquait de scientifiques ; on créa l'École Polytechnique en 1794. En 1804, Bonaparte lui donna un statut militaire avec pour devise : Pour la Patrie, les Sciences et la Gloire. Ces grandes piles donnaient l'impression aux décideurs nationaux qu'avec de puissants moyens scientifiques on obtient de grands résultats.

À rapprocher de l'homme sur la lune, peut-être sur Mars, ou des accélérateurs de particules de plus en plus puissants. Le dernier, le LHC, Large Hadron Collider, mis en service à Genève en 2010 doit peut-être nous faire découvrir la particule, composant ultime des 12 autres connues, le boson de Higgs. La compréhension du Big-Bang va-t-elle donner à manger à plus d'1 milliard d'hommes sous-alimentés, ou bien trouver l'énergie tant attendue pour l'après pétrole et gaz.

2 - Antoine César Becquerel (1788-1878) était le premier d'une lignée de scientifiques, il publia 529 ouvrages sur l'électricité et la chimie.

Son fils Edmond Alexandre (1820 -1891) publia en particulier en 1858 une histoire de l'électricité. Le fils du précédent, Antoine Henri (1852-1908) approfondit les conséquences des rayons X et fut surtout connu par la découverte de la radioactivité, pour laquelle il reçut en 1903 le prix Nobel partagé avec Marie et Pierre Curie.

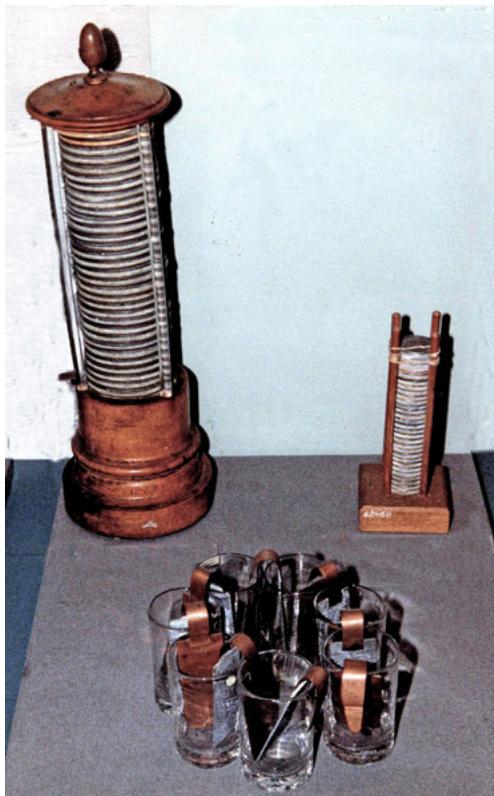
3 - L'électronique, la T.S.F. en particulier, fonctionnaient depuis le début du siècle avec les lampes, tubes à vide, qui amplifiaient en tension, nécessitant des transformateurs, donc du courant alternatif, qu'il fallait ensuite redresser. Avec le transistor à semi-conducteurs, l'amplification d'un signal analogique s'effectua en courant, ne nécessitant que quelques volts en continu, facile à obtenir avec des piles.

4 - Des informations sur le sujet dans "Histoire abrégée des piles à combustibles en France" - Bulletin AHEF 27 - 6/1996. Un site intéressant : annso.freesurf.fr

5 - Gaston Planté (1834-1889), physicien français, fut le père de l'accumulateur, mais il fit d'autres recherches, sur une machine rhéostatique générant des hautes tensions par la décharge de batteries de condensateurs et sur la foudre globulaire. Ses travaux ont été publiés: Recherches sur l'électricité de 1859 à 1879 -Gauthier Villars - Paris 1879, réédition en 1883 puis en 1934 à l'occasion du centenaire de sa naissance.

6 - Essai de la Bonneville Power Administration à Tacoma pour niveler la courbe de charge sur le réseau 500 kV. Revue Alstom n° 5, 1986.

7 - Les recherches d'Auguste de La Rive le conduisirent à inventer le condensateur électrochimique en 1849 (Traité d'électricité T.1 p.391, Genève, (1854-1858). Par sa forte capacité, ce composant est devenu, beaucoup plus tard, indispensable dans tous les circuits électroniques.



Piles de Volta





L'avion à propulsion photo-électrique
la limite du rêve

2 – Générateurs statiques

Produire de l'énergie électrique directement à partir de la chaleur fut, au XIX^e siècle, le grand rêve des électriciens. Encore aujourd'hui, mais aucune piste de recherche valable n'est encore apparue depuis 150 ans, pour améliorer le très médiocre rendement de cette conversion, dépendant de l'incontournable principe de Carnot.

On savait depuis 1840 que l'énergie, sous toutes ses formes, se dégradait en chaleur, mais la transformation inverse, par exemple d'énergie calorifique en énergie mécanique était difficile et très incomplète. Les moteurs à vapeur rendaient sous forme d'énergie mécanique, au plus 10% de l'énergie chimique de combustion du charbon, aujourd'hui avec la vapeur des turbines à 500° C, guère plus de 40%.

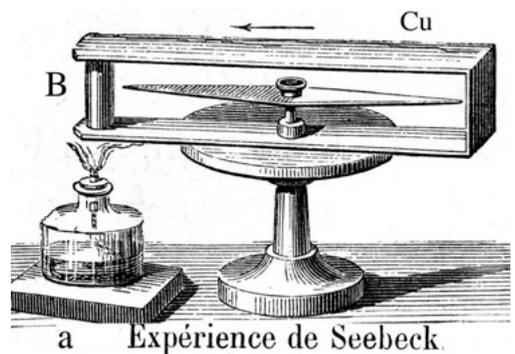
Par comparaison, un moteur thermique au pétrole ne transforme pratiquement que 15 à 20 % de l'énergie chimique du carburant, s'il est à essence, 20 à 30% s'il est au gazole.

La pile thermoélectrique

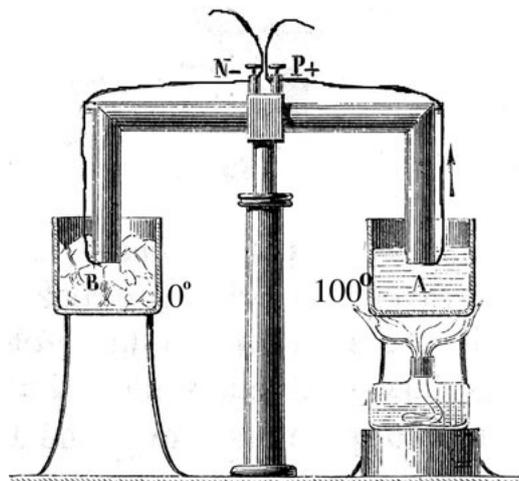
Quel progrès si l'on pouvait transformer directement la chaleur en électricité !

Une piste était apparue dès 1821. Le physicien allemand Thomas Seebeck avait découvert que le chauffage d'une jonction entre deux métaux, l'autre jonction restant froide, provoquait la circulation de courant dans un tel circuit.

Son expérience (a) consistait à souder aux deux extrémités d'un barreau de bismuth les deux branches d'une lame de cuivre pliée en U. En chauffant une seule extrémité, un léger courant circulait dans ce circuit fermé, détecté par la déviation de l'aiguille aimantée placée au milieu. On ne sait pas ce qui le conduisit à faire cette expérience très particulière. Il recensa les couples de différents métaux donnant un effet intéressant, mais ce furent d'autres qui approfondirent les lois de ce phénomène : A.C. Becquerel, Tait, W. Thomson (1).



a Expérience de Seebeck



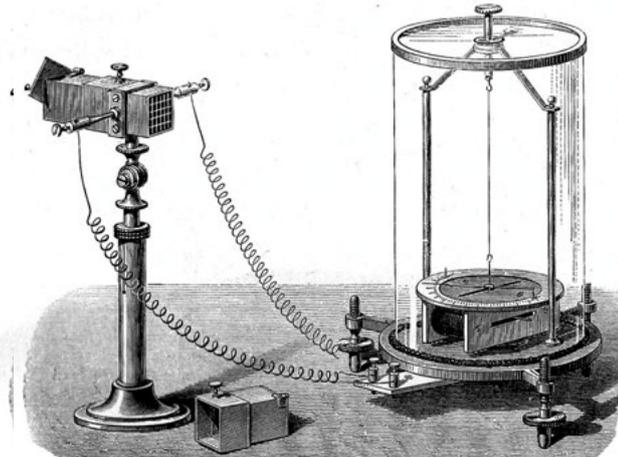
b Pile thermo-électrique de Pouillet

Mathias Pouillet utilisa en 1830 une pile thermoélectrique pour ses expériences de recherche des lois de l'électrocinétique (b). L'une des jonctions bismuth-cuivre trempait dans la glace, l'autre dans l'eau bouillante. Il réalisa aussi sur ce principe un pyromètre avec un canon de fusil, permettant de mesurer des températures élevées dans des fours (1836).

Ce phénomène était proche de la théorie de Volta, l'existence d'une tension au point de contact de métaux hétérogènes, malheureusement incapable de générer un courant sans un emprunt d'énergie quelque part. Si l'on chauffait l'une des jonctions, l'énergie calorifique permettait la génération d'un courant.

L'étonnant était que le phénomène était réversible : Jean Charles Peltier découvrit en 1834 qu'en faisant traverser par un courant les deux jonctions de métaux différents, l'une s'échauffait, l'autre se refroidissait, ce fut l'effet Peltier appliqué à des petits réfrigérateurs.

La force électromotrice d'une jonction thermoélectrique est de l'ordre de quelques centièmes de volts pour une température de 100°C ; cela ne rebuta pas trop nombre d'expérimentateurs qui essayaient de mettre en série des dizaines ou centaines de couples pour essayer de recueillir un courant utilisable. La principale difficulté était de porter la jonction chaude à la température la plus haute possible, sans que cette chaleur se transmette trop à la jonction froide.



c Thermo-multipliateur de Nobili et Melloni

Vers 1851, les physiciens italiens Nobili et Melloni ont construit une pile avec des couples bismuth-antimoine, destiné à étudier la chaleur rayonnée par la lumière, le courant étant mesuré avec le galvanomètre (c). Melloni remarqua que la chaleur était plus forte pour l'infrarouge. L'appareil était sensible même au rayonnement d'une bougie allumée à moins d'un mètre.

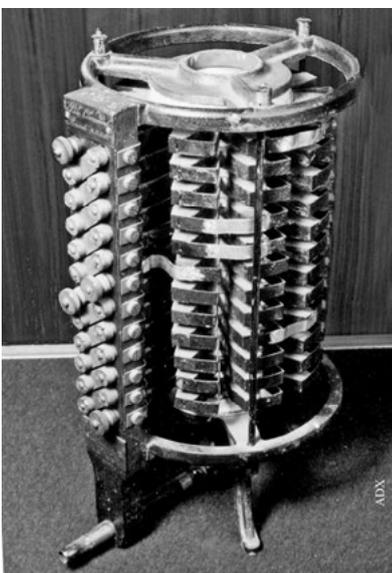
Une première pile construite pour un usage énergétique fut celle de l'Autrichien Noë. Avec une centaine de couples maillechort-antimoine chauffés par une lampe à alcool, on obtenait environ 1 volt et 2 ampères.

Les réalisations les plus abouties ont été celles du français Clamond. D'abord en 1874 un modèle constitué de couronnes superposées chacune avec 10 éléments de fer et d'un alliage antimoine-zinc (d). Avec 130 éléments, on atteignait 8 volts avec une résistance totale de 3,2 ohms. Afin de récupérer la chaleur, il réalisa un modèle semblable à un gros poêle avec cheminée (e) ; les 6000 éléments donnaient 120 V et alimentaient deux lampes à arc en série, avec 10 kg de coke brûlés par heure.

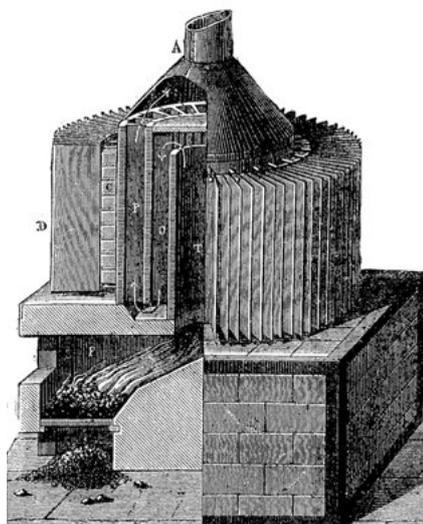
Le système avait 2,5 m de hauteur et 1 m de diamètre, c'était ce que nous appelons de la cogénération, plus de 99,5% de chaleur avec 0,5% d'électricité.

On comprend qu'avec un rendement aussi faible, malgré l'ingéniosité des inventeurs, la pile thermoélectrique fut pratiquement abandonnée.

Aujourd'hui que reste-t-il de cette exploration ?



d Pile thermo-électrique Clamond



e Fourneau thermo-électrique Clamond

– Le rendement a été un peu amélioré en constituant des couples avec 2 semi-conducteurs, l'un de type p, l'autre de type n. Des engins spatiaux utilisent ce principe fiable dans des conditions extrêmes, associé à la source de chaleur d'un radio-isotope.

– Le système de mesure classique de la température par le couple thermoélectrique, avec une variante, la canne pyrométrique de Pouillet.

– L'effet Peltier trouve des applications dans le refroidissement à petite échelle, par exemple celui des glacières de camping branchées sur le 12 V d'un véhicule.

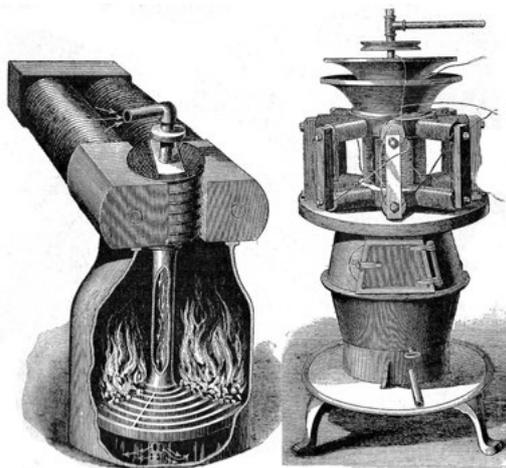
Générateurs thermoélectriques

À la fin du siècle, Etienne Hospitalier, directeur de la revue "*L'industrie électrique*" écrivait :

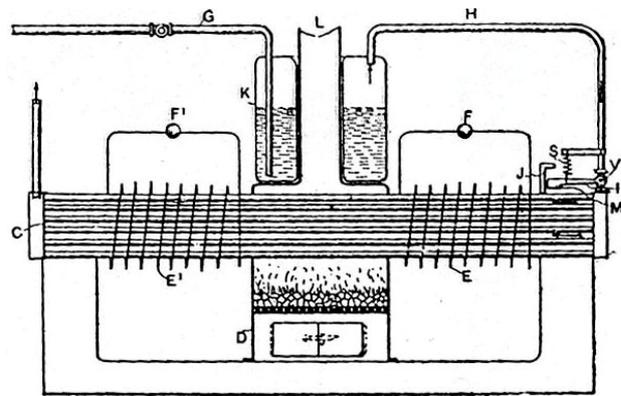
« La transformation directe de l'énergie thermique produite par la combustion du charbon ou du gaz en énergie électrique fait toujours l'objet des recherches d'un grand nombre d'inventeurs et de savants. On lit de temps en temps l'annonce d'une découverte destinée à révolutionner tous les procédés actuels et à reléguer à la ferraille les moteurs à vapeur et les dynamos de nos usines électriques. Jusqu'à ce jour, rien ne nous permet de renoncer à cette transformation sans passer par un intermédiaire jusqu'ici fatal : le travail mécanique.... ».

Le journaliste rappelle que la pile thermoélectrique ne peut espérer mieux que 0,8% de rendement, elle est donc hors course. Il poursuit :

« ...En 1887, Edison fit grand bruit autour d'un appareil qu'il dénomma générateur pyromagnétique, dans lequel l'énergie électrique était – devait être serait plus exact – engendrée par les variations de perméabilité magnétique du fer avec la température. Un modèle sous verre figura à l'exposition universelle de 1889, mais nul ne le vit fonctionner et oncques n'entendirent parler des résultats obtenus avec ce générateur, qui continue toujours à figurer en bonne place sur la longue liste des merveilleuses découvertes du célèbre inventeur ».



f Machines pyromagnétiques Edison



g Générateur thermo-magnétique de Tesla - 1890

La figure (f) donne une idée des machines brevetées par Edison, celle de gauche était un moteur, celle de droite un générateur. Inutile d'en décrire le détail puisqu'elles ne pouvaient fonctionner. C'était l'un des points faibles de cet homme qui avait de réelles qualités d'organisation du travail et de fortes compétences industrielles, mais dont le niveau technique en électricité et en physique devait être inférieur à celui d'un C.A.P. d'aujourd'hui.

Pour ne pas être en reste, Tesla, son concurrent acharné au moment de la guerre des courants (1883/1891), utilisa un principe en vogue à cette époque, la démagnétisation alternée d'un circuit par la chaleur, pour faire lui aussi son prototype de générateur thermomagnétique (g). Il ne donnait pas grand-chose, mais fonctionnait. Sans trop anticiper sur la suite, signalons que Tesla fut l'un des électriciens promoteur du courant alternatif, en particulier à hautes fréquences, alors qu'Edison comprenait tout juste le courant continu.

Ces découvreurs de l'électricité, à la fin du siècle, ne furent pas les seuls à espérer inventer ce générateur thermoélectrique. Quand et qui résoudra ce problème ?

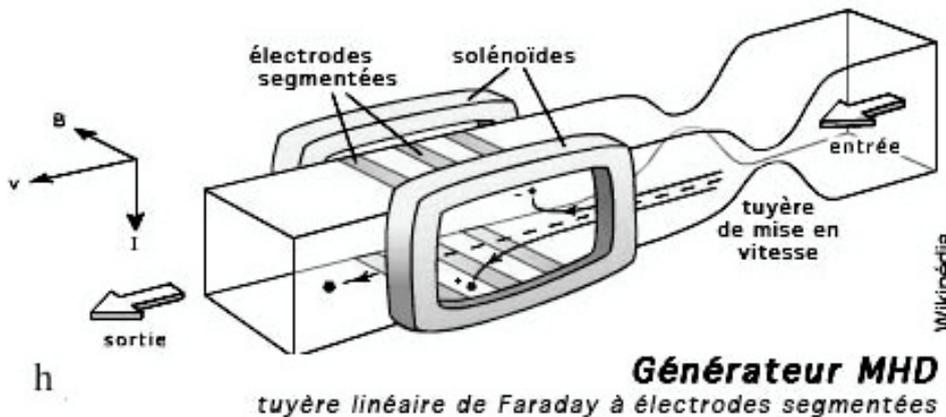
Magnéto-Hydro-Dynamique - MHD

Tous les pays en expansion après WW2 avaient grand besoin d'énergie, d'électricité en particulier. Les électriciens restaient prisonniers de cet incontournable rendement Carnot, qui ne permettait guère de dépasser 40% comme rendement global de leurs centrales thermiques. Le nucléaire apparaissait avec juste 33 %.

Des moteurs MHD avaient été réalisés depuis 1942 pour propulser un liquide conducteur dans une canalisation, en appliquant un champ magnétique perpendiculaire au tuyau et en faisant circuler un courant transversal dans la veine liquide conductrice, l'application de la loi de Laplace. Il était aussi envisagé d'en faire un système de propulsion de véhicules.

Faraday et Wollaston avaient montré avec la Tamise que le procédé était réversible, on pouvait donc en faire un générateur d'électricité.

La technique envisagée dans les années 1960 appliquait la loi de l'électrodynamique d'Ampère-Laplace : Une chambre de combustion où brûlait du pétrole, de l'alcool, du gaz ou même du charbon pulvérisé, propulsait à grande vitesse dans une tuyère un gaz ionisé, un plasma à haute température, plus de 2000 °C. L'ionisation qui augmentait la conductibilité était accru par un ensemencement de potassium ou césium alcalin, matériaux à faible potentiel d'ionisation.



Sur la section utile de la tuyère (h) était appliqué perpendiculairement un champ magnétique très puissant obtenu par des bobines supraconductrices, technique qui progressait à l'époque, malgré la nécessité de l'hélium à moins de 20 °K. On l'espérait temporaire. Sur les deux

autres faces de la tuyère étaient placées des électrodes métalliques pour recueillir le courant généré. Ce courant continu devait être transformé en alternatif par un onduleur. Les gaz qui sortaient, ayant cédé une partie de leur énergie cinétique, restaient encore très chauds. Ils traversaient un échangeur thermique, générant de la vapeur, ensuite turbinée dans un système classique.

Le rendement espéré sur les prototypes atteignait déjà 50 %, avec possibilité de 70%, aussi ce fut un effort de recherche mondial. Au 3e congrès de la MHD, à Salzbourg en 1966, 410 chercheurs de 26 nations ont discuté de 256 rapports. Plusieurs filières avec de multiples variantes étaient étudiées, des prototypes ont fonctionné aux USA, en France et depuis 1971 une centrale opérationnelle de 25 MW fonctionnait en URSS avec du gaz. Mais vers 1968, les recherches se sont ralenties partout pour s'arrêter en 1970, à la fois pour des raisons de conjoncture économique et les problèmes technologiques de tenue des matériaux à très haute température (2).

Il n'est pas impossible que le procédé reprenne vers 2050 en complément ou association de celui d'ITER, générateur à fusion nucléaire, lequel, s'il est validé, s'appuiera aussi sur des puissants aimants supraconducteurs et des plasmas à des millions de degrés. Le problème de la tenue des matériaux à très hautes températures sera-t-il dominé ?

À remarquer que le générateur MHD ne transforme pas, comme les anciennes piles, directement la chaleur en électricité, mais par des moyens se substituant au couple classique turbine à vapeur et alternateur. Peu importe, l'essentiel c'est le rendement, cette inexorable fatalité que Carnot nous a révélé.

Le rêve du générateur thermoélectrique industriel, l'un des Graal des électriciens, restera-t-il toujours inaccessible ?

Générateur photoélectrique

Transformer la lumière en électricité est un procédé appliqué à l'origine aux posemètres photographiques avec cellules photoélectriques, très utiles aux photographes avant les années 1960. Depuis le développement des semi-conducteurs, il connaît un fort regain d'intérêt, le silicium étant un matériau photoélectrique bien mieux adapté que le sélénium à des applications énergétiques.

On attribue souvent, par erreur, la découverte de la photoélectricité à Antoine Becquerel, le premier d'une lignée de quatre physiciens. Au cours de ses travaux de recherche sur tous les moyens de produire de l'électricité, il découvrit en 1840 que les réactions chimiques opérées sous l'action de la lumière pouvaient donner lieu à des effets électriques comme ceux qui se manifestent quand deux corps réagissent chimiquement l'un sur l'autre (comme dans les piles). Il étudia le phénomène avec un appareil qu'il dénomma actinomètre électrochimique, en particulier avec la transformation du bromure d'argent sous l'effet de la lumière, base du papier photographique à venir (3).

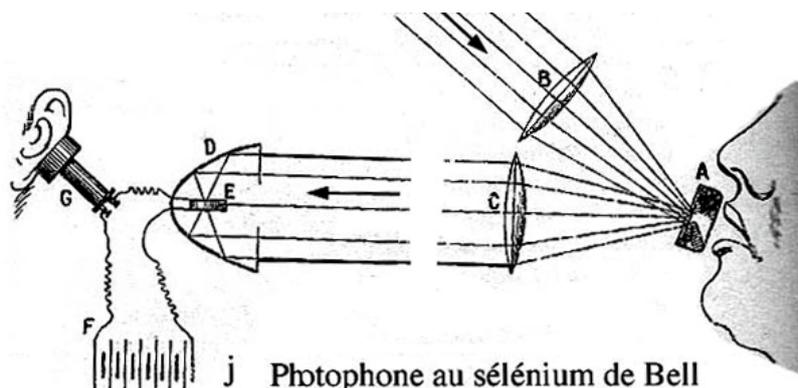
Cet génération d'un courant, par une réaction électrochimique, elle-même provoquée par la lumière ne peut être classé dans les effets photoélectriques mais les photochimiques. De plus il subsiste une confusion chez certains auteurs entre deux catégories d'effets photoélectriques différents.

– Les uns sont l'émission d'électrons hors du métal éclairé, donc dans le vide (Hertz, Hallwachs, Einstein) mais n'ont pas eu d'application pratique. Cet effet a cependant permis la découverte du photon par Einstein, ce grain de lumière, que l'on envisageait depuis les grecs (4).

– Les autres consistent dans une modification interne de la résistance d'un métal, ou la génération d'un courant, sous l'effet d'un rayonnement. Ils ont fait l'objet d'applications pratiques. Le métal utilisé était le sélénium, découvert en 1817 par Berzelius. Sa propriété de photoconductivité variable avec la lumière fut remarquée par Knox et Hittorff en 1837. C'était un mauvais conducteur, sans grand intérêt jusqu'à ce qu'un agent du télégraphe, Willoughby Smith, l'étudie en 1873. Deux Anglais Adams et R.E. Day communiquent alors le 18 mai 1876 à la Royal Society un mémoire approfondi sur le sélénium, sa propriété de résistance variable à la lumière et de génération d'un courant électrique (5).

Werner Siemens avait, à la même époque, présenté à l'académie de Berlin les propriétés photoélectriques du sélénium. Il utilisa ce sélénium pour réaliser d'abord un photomètre, puis en 1885 un capteur d'énergie solaire. C.E. Fritts de New York en fit une sorte de pile capable de fournir un faible courant. Le sélénium est fondu en couche mince sur une plaque de fer puis recouvert d'un film fin, donc translucide, d'or battu. Le fer et l'or constituent alors les deux électrodes du générateur.

L'un des inventeurs du téléphone en 1876, G.Bell, conçut peu après le photophone, téléphone à transmission optique, utilisant la résistance variable d'une cellule au sélénium en fonction de la lumière (j). Il ne fut jamais appliqué. Aujourd'hui, la fibre optique et le laser le permettrait.



Des générations de photographes, depuis 1920, ont utilisé cette cellule photoélectrique de Siemens-Fritts qui donnait la valeur de l'éclairement suivant la déviation d'un petit galvanomètre par le courant de la cellule.

Les appareils d'après 1960 avaient une pile interne permettant d'ajuster automatiquement le temps de pose et le diaphragme en fonction de l'éclairement. Une photorésistance en sélénium modulait le courant en conséquence. Cette cellule au sélénium était intéressante pour de la mesure, mais pas sur le plan énergétique, son rendement étant autour de 0,2 à 0,5 %. Une autre application importante a été le cœur du photocopieur, inventé en 1938 par Xerox, un cylindre revêtu de sélénium dont la conductivité croît avec la lumière.

Après la découverte du transistor à semi-conducteur aux Bell Labs en 1948, les chercheurs ont compris rapidement que le sélénium était précisément un semi-conducteur et en ont cherché d'autres produisant aussi l'effet photoélectrique. Le silicium devenu classique après le germanium s'est révélé en 1955 bien plus performant et moins coûteux que le sélénium et a ouvert la voie vers des applications énergétiques très intéressantes d'abord pour fournir pendant des années de l'énergie électrique aux satellites de communication, le premier équipé a été Telstar en 1962. Ces nouvelles cellules photoélectriques étaient des Solar Cells, batteries ou cellules solaires, devenues bizarrement photovoltaïques vers cette époque (6). Une application importante a été ensuite le capteur de lumière pour les premiers câbles à fibres optiques de transfert d'information vers 1970.

A partir des années 1980, la recherche d'énergies, dites nouvelles, pour remplacer les énergies fossiles en voie d'épuisement, conduisit à développer des panneaux avec de multiples cellules de quelques cm, produisant chacune 0,5 V, pour générer du courant continu à un voltage convenable par mise en série et parallèle des cellules.

Cette énergie, nouvelle pour les médias, n'est que la découverte d'un nouveau matériau semi-conducteur, le silicium, assurant une transformation de l'énergie solaire directement en électricité bien plus performante qu'avec le sélénium. Si son coût d'investissement, encore élevé, baissait fortement, elle pourrait jouer dans l'avenir le rôle d'une énergie complémentaire pour les réseaux électriques, malgré son talon d'Achille, l'intermittence à quelques 10% du temps (II-5).

Générateur piézo-électrique

Pierre Curie découvrait en 1880 que des cristaux, tel le quartz, lorsqu'ils sont soumis à une forte pression suivant un certain axe, génèrent une tension électrique suivant un autre axe. L'effet est réversible, l'application d'une forte tension entraîne la compression du cristal.

Ce phénomène étrange est resté longtemps une simple curiosité de laboratoire, mais après WW2 s'est posé le problème de communication avec les sous-marins. Les ondes radios pénètrent mal dans l'eau, mais le son s'y propage très bien, d'après les essais fait dans le lac Léman par le genevois Daniel Colladon en 1826. Il avait alors proposé à l'amirauté anglaise d'établir un télégraphe acoustique par la mer entre la France et l'Angleterre.

La solution des ultrasons s'imposait, mais avec quels émetteurs et récepteurs? Des équipes de recherches ont fabriqué des céramiques piézo-électriques PZT, à base de titanate de baryum, beaucoup plus performantes que les cristaux naturels.

Cet effet ne peut transformer en électricité, et vice-versa, qu'une quantité très minime d'énergie mécanique. Il est par contre bien adapté à la transmission d'informations à fréquence très élevée. Étant à la fois émetteur et récepteur, il exploite facilement l'effet Doppler (1842) consistant à mesurer le temps mis par un signal pour atteindre un objet où il se réfléchit et le retour de l'écho de ce signal, dont on déduit la distance. Si ce temps varie parce que l'objet est mobile, on en déduit la vitesse. C'est le radar sous-marin.

Ainsi de nombreuses applications se sont développées, émetteurs et récepteurs ultrasoniques, sonars, transducteurs, capteurs. Les applications les plus connues sont les sonars pour la mesure de la profondeur en mer, les communications avec les sous-marins, l'échographie pour imagerie médicale et le plus ordinaire, l'allume gaz piézo-électrique, parfois dénommé électronique, capable de générer plusieurs kV, mais sans énergie dangereuse.

Compléments

1 - Ces chercheurs ont établi une liste des métaux dont les jonctions génèrent un courant. Le courant est d'autant plus important que les métaux sont éloignés sur la liste : Bismuth, nickel, platine, cobalt, manganèse, argent, étain, plomb, cuivre, or, zinc, fer, antimoine. Ainsi l'effet est maximum entre le bismuth et l'antimoine, bon entre nickel et zinc ou fer, etc. On ne trouve apparemment pas une particularité de ces éléments dans le tableau de Mendeleev (1869)

2 - J.FABRE ET J.PÉRICART " L'aventure de la MHD. Les raisons d'un abandon. Revue française de l'énergie, n°225, p.5/9 — URL wikipedia.org/wiki/Générateur_MHD

3- E.BECQUEREL - Histoire de l'électricité et du magnétisme - Firmin Didot, Paris 1858, p. 171/172. Effets électriques dus à l'action chimique de la lumière, Comptes-rendus de l'Académie t. IX, p.145, t.XIII, p.198.

4 - L'effet photoélectrique par émission d'électrons a été découvert par Heinrich Rudolf Hertz, au cours de sa découverte des ondes électromagnétiques. Il a remarqué en 1887 que certains métaux (cathode) dans une ampoule vide, frappés par un rayonnement ultraviolet émettaient un courant électrique, que l'on captait par une autre électrode (anode). C'était ce que Crookes avait dénommé les rayons cathodiques en 1878. C'était en fait un flux d'électrons, ce qui permit à J.J. Thomson de découvrir l'électron en 1897, ce grain d'électricité que l'on cherchait depuis longtemps.

L'année suivante, l'un de ses étudiants, Hallwachs, découvre qu'une plaque de zinc éclairée aux U. V. dans le vide se charge positivement, et inversement, si elle est chargée négative, le rayonnement la décharge. L'explication viendra après la découverte de l'électron. L'explication d'Einstein en 1905 de la photo-émission d'électrons lui a permis de découvrir le photon, particule de la lumière comme de tout autre champ électromagnétique.

5 - Sur le sélénium : J.E.H. Gordon, Traité d'électricité t. 2, Baillière, Paris, 1881, p. 594/606.

6 - Cellules photovoltaïques. Quel mauvais vulgarisateur a donc inventé cette dénomination erronée que d'autres ont recopié sans réfléchir ? La génération d'un courant par effet photoélectrique est fondamentalement différente de celle d'un courant produit par électrochimie, base de la pile de Volta. Qu'on change de nom pour désigner les nouveaux composants au silicium pour les différencier de ceux au sélénium est déjà surprenant, mais qu'on change le nom de l'effet photoélectrique utilisé depuis plus d'un siècle en photovoltaïque ne peut être que le fait d'un journaliste en mal d'originalité. Einstein serait très surpris d'apprendre que la photo-électricité qu'il a expliqué serait assimilée à la pile de Volta.

7 - Quel est cet étrange abat-jour de lampe à pétrole (k) ?

Une pile thermoélectrique chauffée par la lampe et alimentant à l'arrière un petit poste-radio ancien, à lampes. C'est une invention d'URSS permettant l'écoute radio dans des lieux isolés sans électricité. Mais ce serait plutôt une erreur de propagande, vu qu'avec les 24 éléments de pile, même bien chauffés, on n'arriverait même pas à éclairer la lampe d'éclairage du cadran de 2 W.





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.

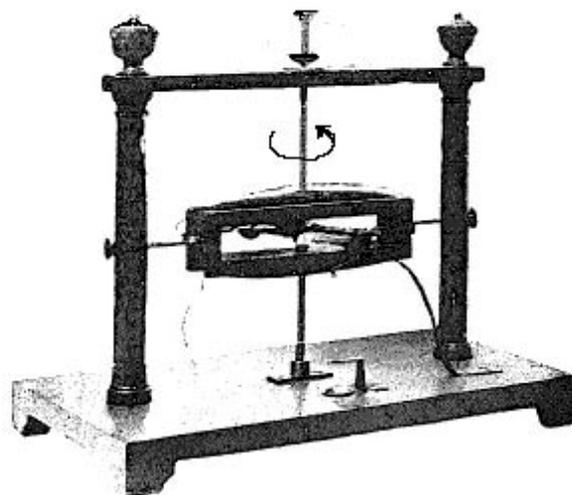
Quant à l'alternateur, la machine qui fabrique 97% de notre électricité, après une fugitive maquette disparue de Pixii, aucun inventeur n'en a jamais réclamé la paternité. Il est apparu comme un avatar pour une utilisation marginale, l'éclairage par arc, d'abord celui des phares. Mais on n'imaginait 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.

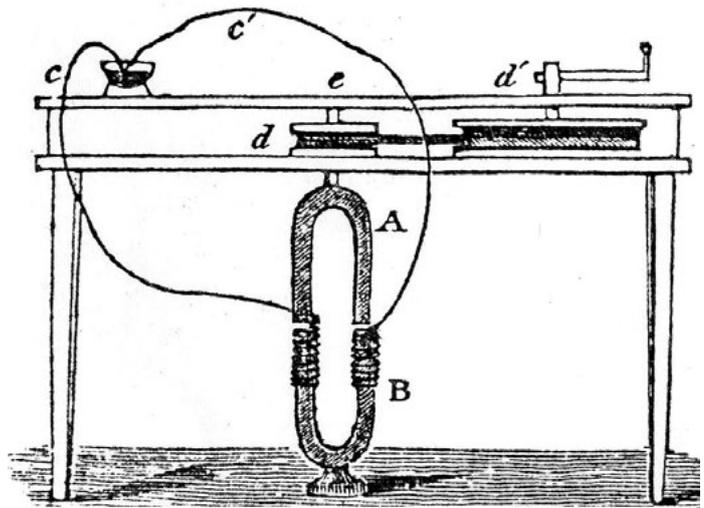


a Première génératrice de courant continu
Machine à induction d'Ampère-Pixii -1832

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.

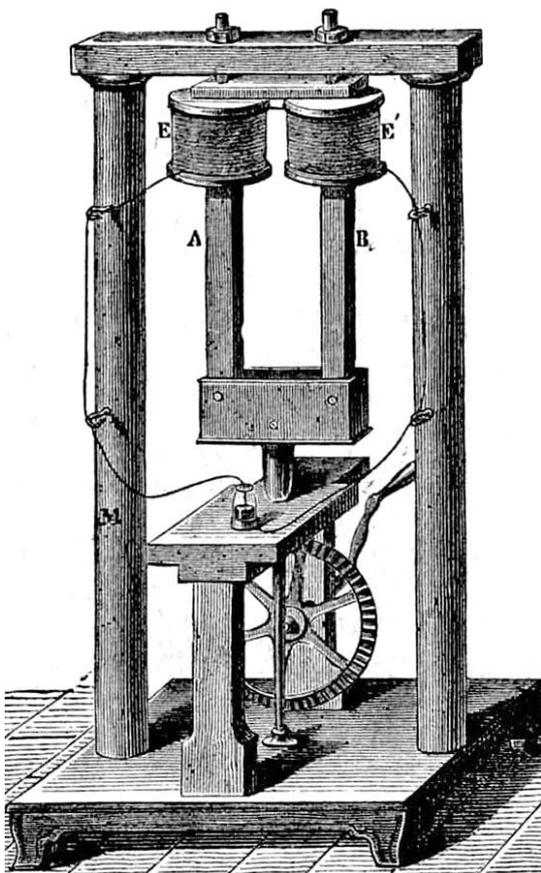


Pixii magneto generator, without commutator.
b *American Journal of Science*, April 1833, vol. 24.

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.

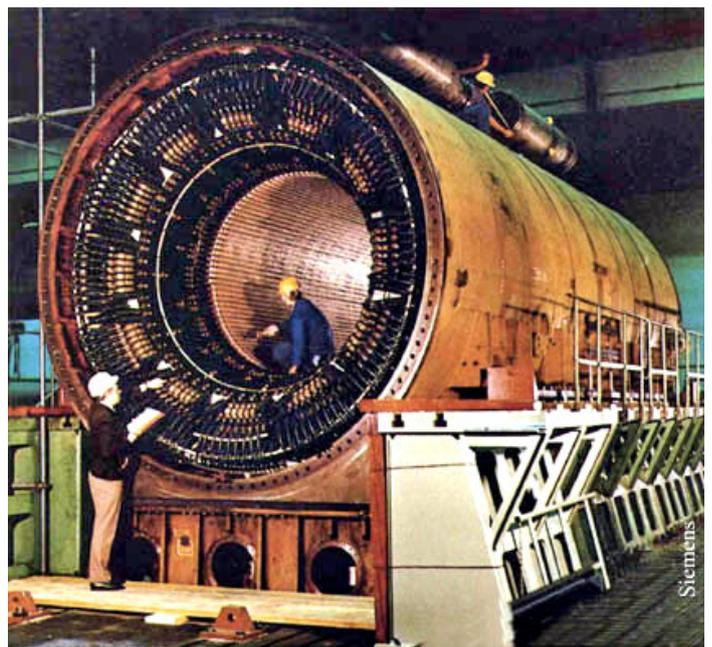
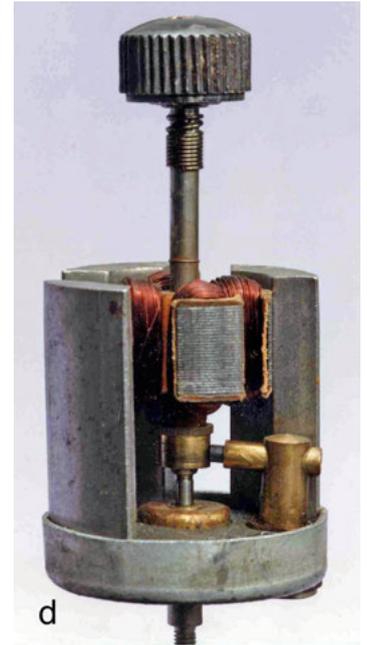
Mais les expérimentateurs n'avaient que faire de ce bizarre courant changeant de sens à chaque tour de manivelle et Ampère trouva rapidement une solution pour « redresser » ce courant, en le transformant en pseudo-continu.

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.

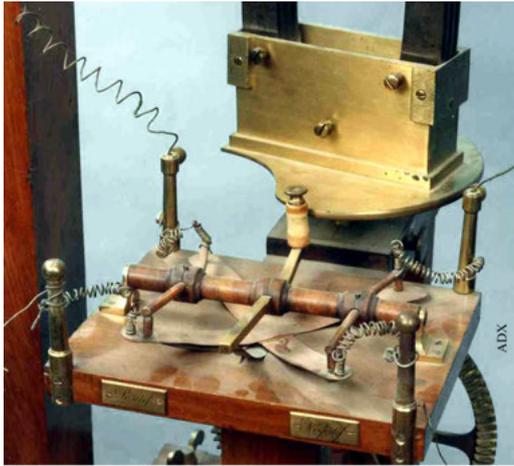


e Alternateur Siemens

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 ».

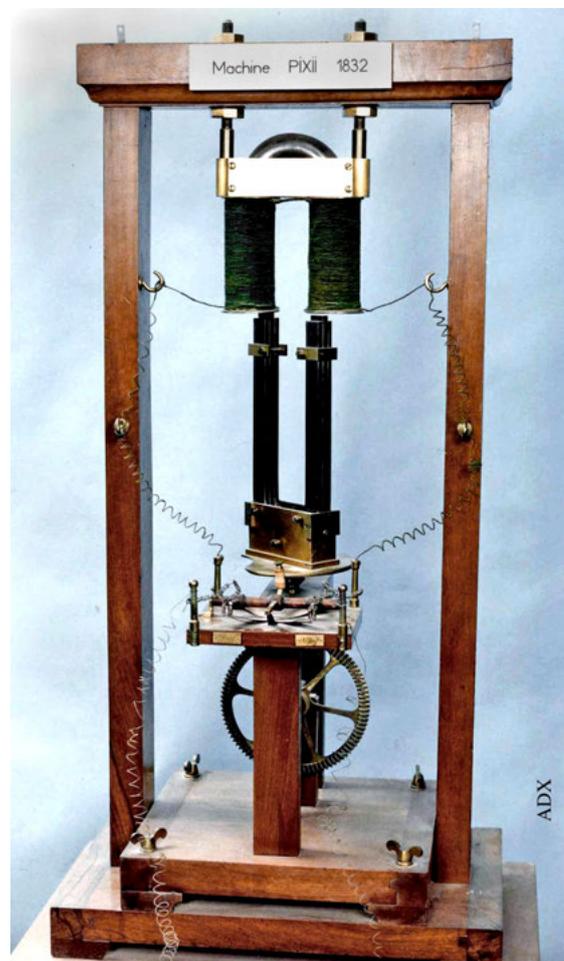
Remarquons comme Ampère s'efface pour laisser la paternité de la machine à son constructeur d'appareils scientifiques. Modestie naturelle, ou peut être aussi en remerciement de tous les bricolages et appareils d'expériences, certainement mal ou pas payés, qu'il lui avait construit depuis des années.

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.

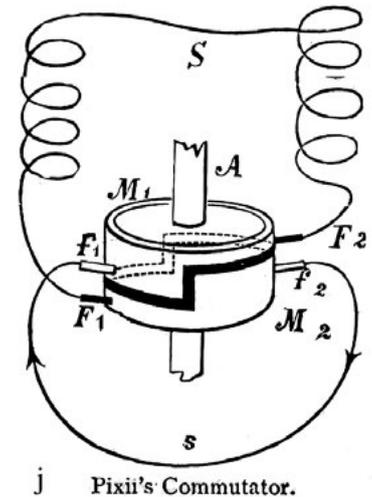


temps sans emploi d'acide, sans aucune préparation, ni détérioration. »

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).



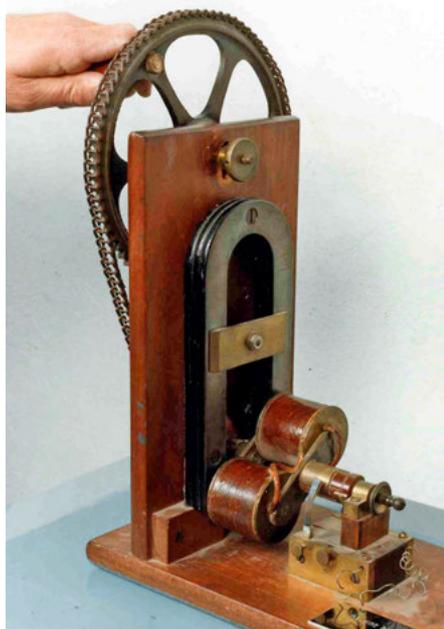
Un modèle de Ducretet, exposé au CNAM (inv. 12190), a un commutateur particulier à quatre frotteurs.

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.

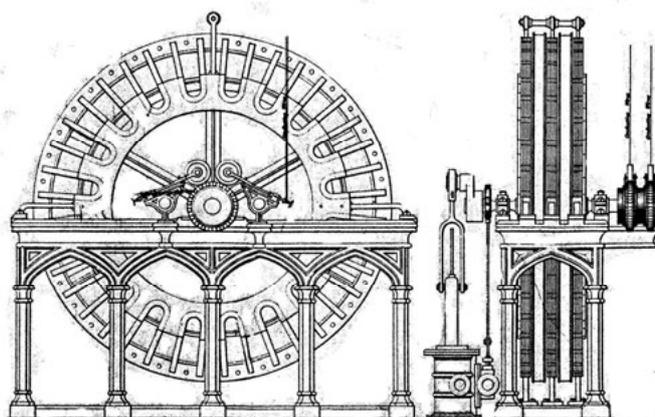
À la recherche de générateurs plus puissants.

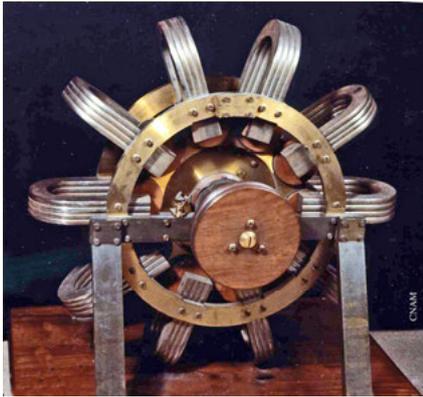
Deux constructeurs réalisèrent des machines très semblables, mais chacun d'un côté du Channel. France et Angleterre étaient en compétition scientifique stimulante. C'était un regroupement de dizaines d'éléments genre Clarke, disposés en couronne de 4, 6, ou 8 bobines induites tournant devant l'entrefer 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.

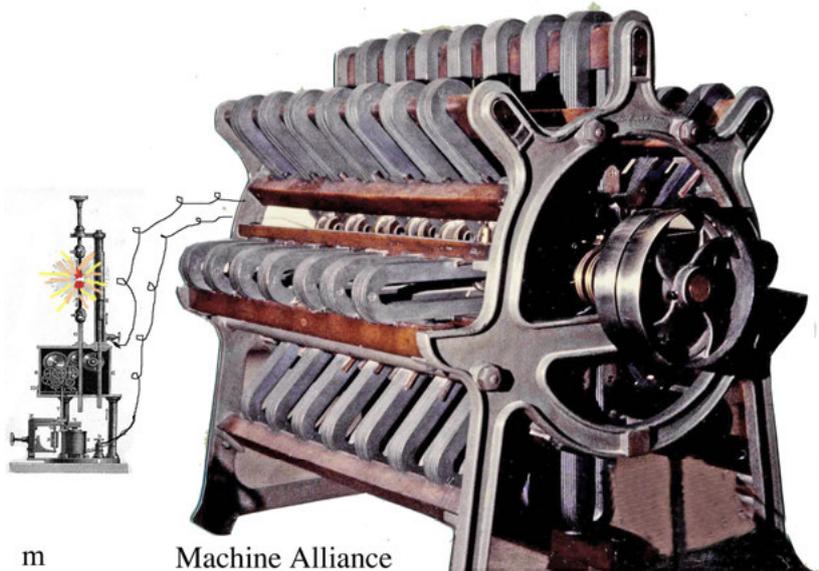
Sur le continent, Florise Nollet, professeur de physique à Bruxelles, descendant de l'abbé, célèbre au temps de l'électrostatique, se propose de construire en 1849 une machine proche de celle de Wollrich (kb) avec 5 couronnes de 16 bobines tournant entre 4 aimants fixes.

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

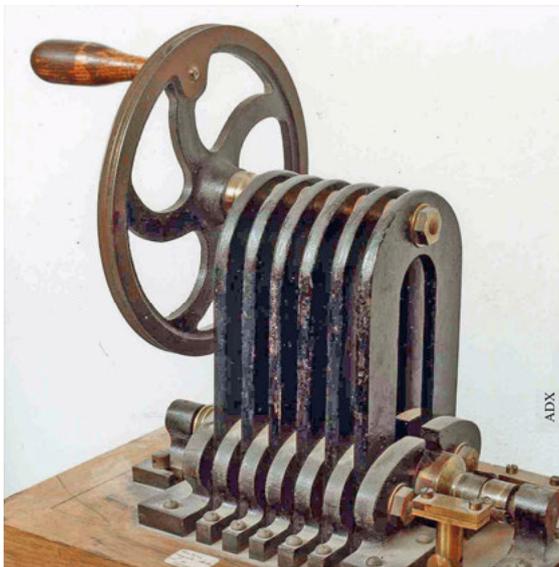
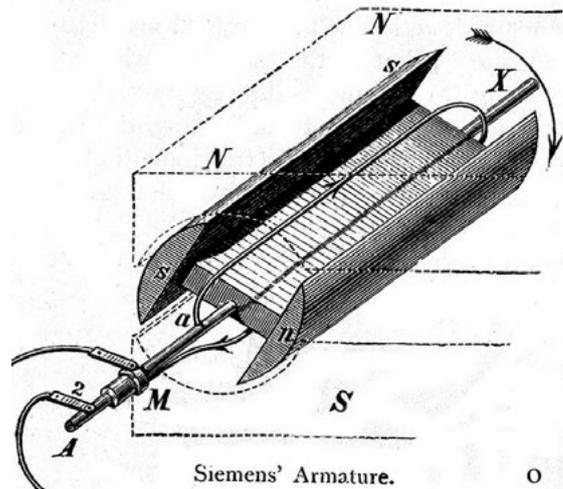
Sciences et techniques avancent rarement par un grand bond, plutôt par une série de petits pas. Trois furent nécessaires avant d'arriver à la solution tant cherchée.

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.

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

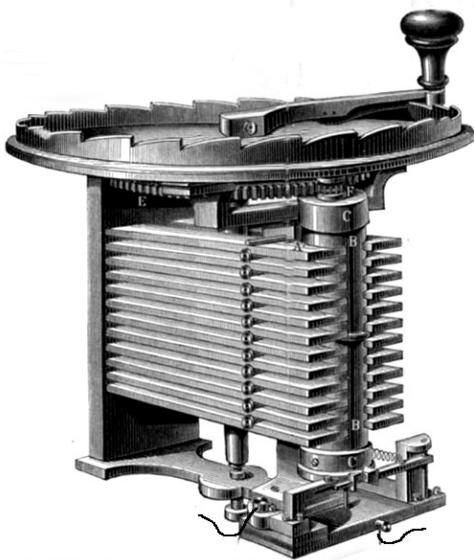
Le résultat se révéla satisfaisant, mais le courant produit s'obstinait toujours à être alternativement renversé ; il fallait le transformer en courant continu avec un commutateur.

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.

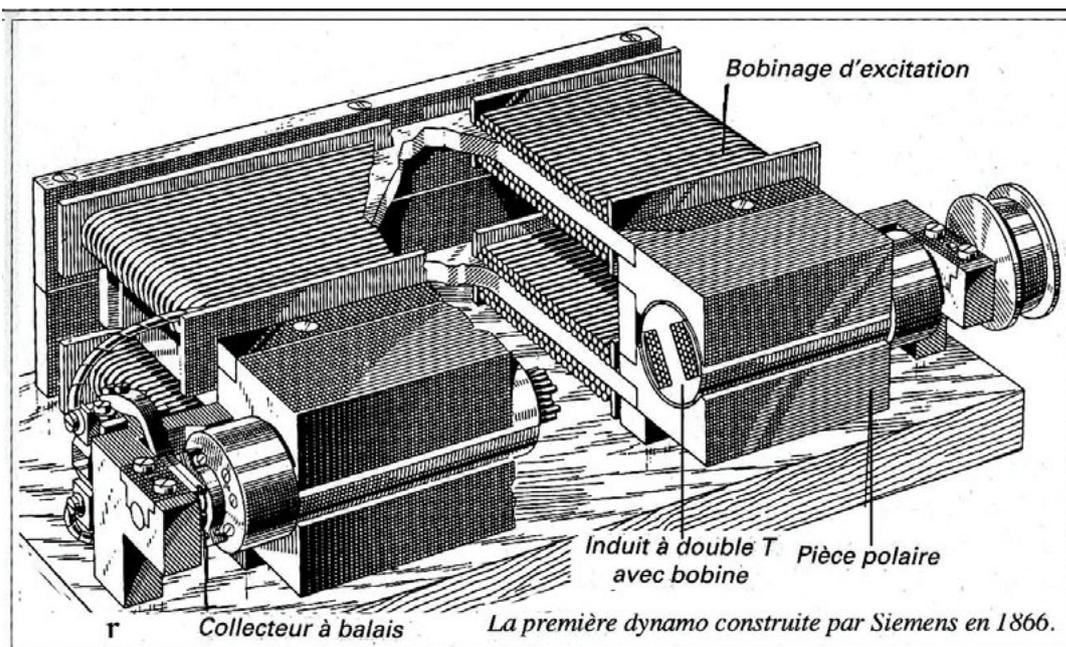
L'autoexcitation

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.

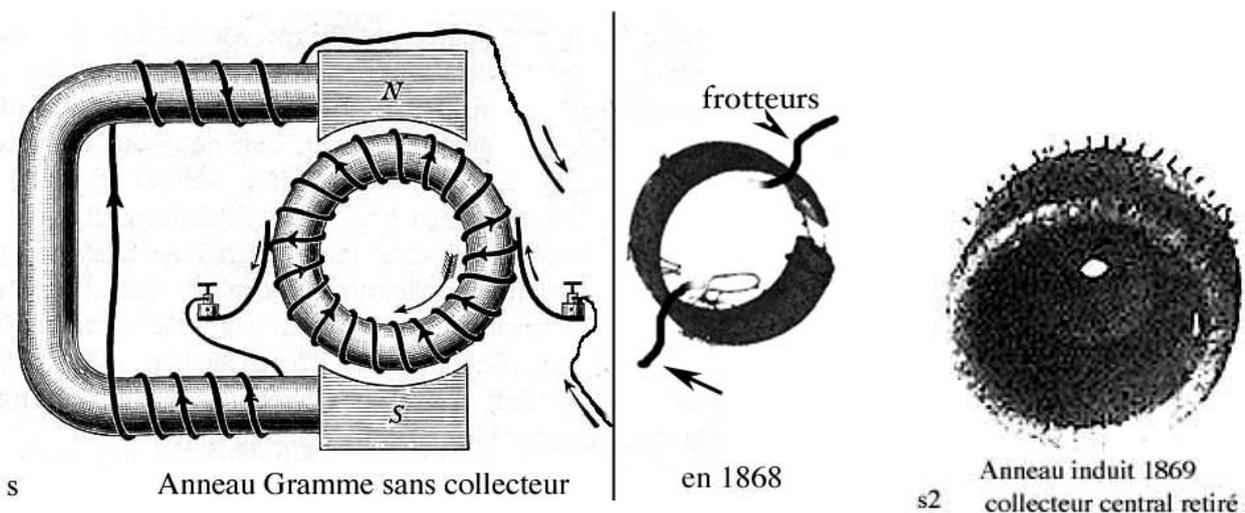
Le 24 décembre 1863, il fait prendre par un intermédiaire, Mathieu, sachant bien rédiger en français, un premier brevet sur des « Perfectionnements aux machines magnéto-électriques », du type Alliance. Pendant les années 1864 et 1865 il travaille pour l'ingénieur Ernest Bazin à l'éclairage électrique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

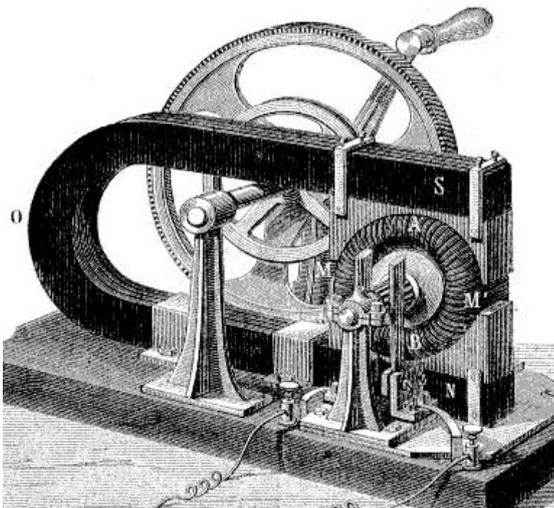
La collection des premiers appareils de la Société Gramme a été dispersée après l'exposition de 1900, ne nous laissant que ces obscures photos pour reconstituer la progression de l'invention avec ses machines successives (8). Un livre de Sartiaux les décrivant est accessible sur le web (9).

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 magnéto-électriques 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.

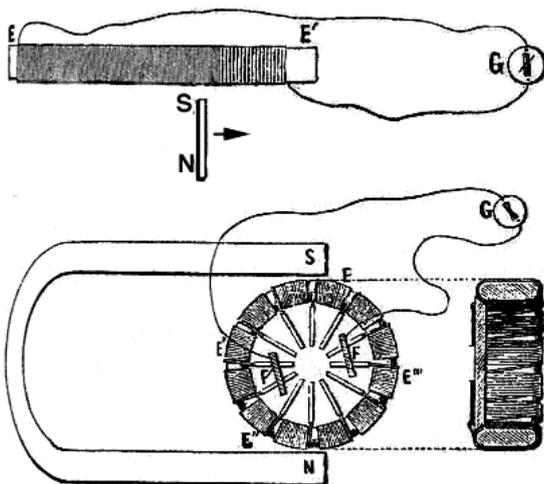
À peine revenu à Paris en juin 1871, il fait présenter à l'Académie par Jamin le 17 juillet 1871 une note : « Sur une machine magnéto électrique produisant des courants continus », accompagnée de l'une de ses machines prototypes.

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.

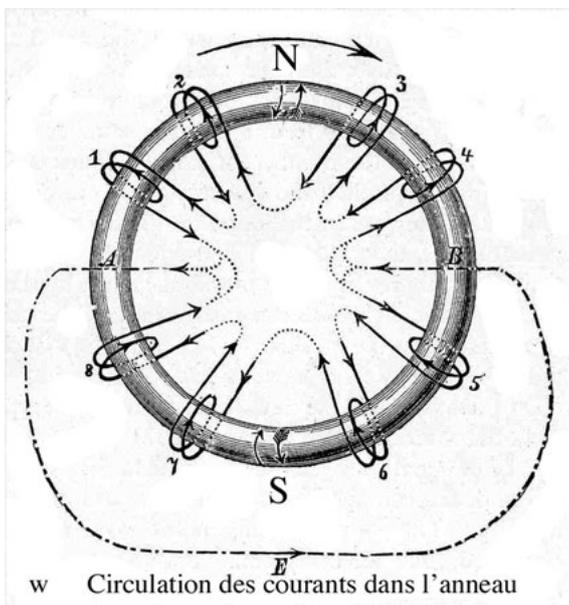
L'invention

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



w Circulation des courants dans l'anneau

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 :

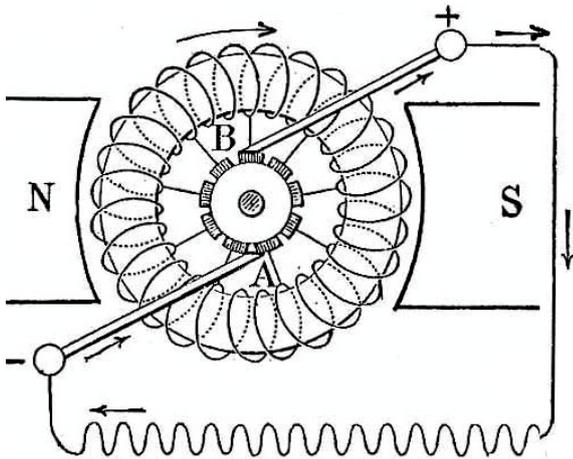
« Les courants d'induction sont en général instantanés et se produisent alternativement en sens contraire. Il n'est cependant pas impossible d'en produire qui échappent à ce double caractère.

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. »

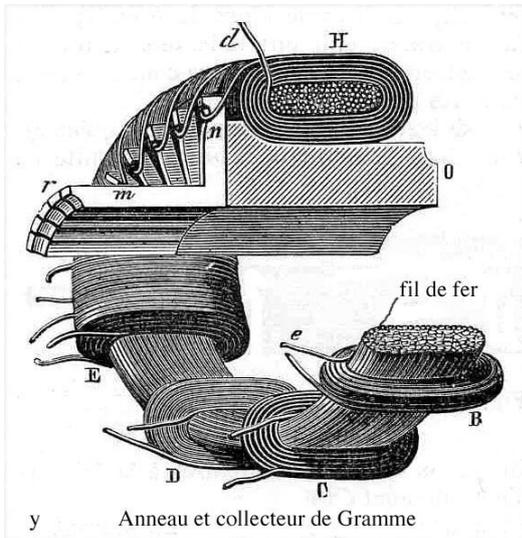
Supposons que l'électro-aimant prenne la forme circulaire E, E', E'', E'''. Soumettons le à l'action des deux pôles NS d'un aimant... et que l'électro-aimant tourne d'un mouvement uniforme. Le pôle S produira dans la partie de l'anneau proche un courant dans un sens déterminé comme précédemment. On comprend 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.

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).

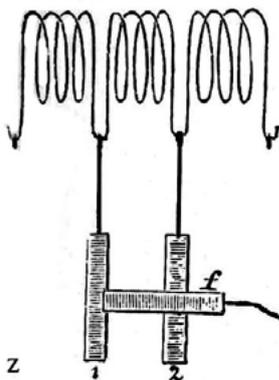
Puis la description de l'enroulement du fil «...De cette façon, tout le fil enroulé sur l'anneau forme un conducteur sans fin, divisé en un certain nombre de parties dont les points de jonction sont soudés à des pièces en laiton d'une solidité et forme convenable pour résister à un frottement prolongé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



y Anneau et collecteur de Gramme

« 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). »

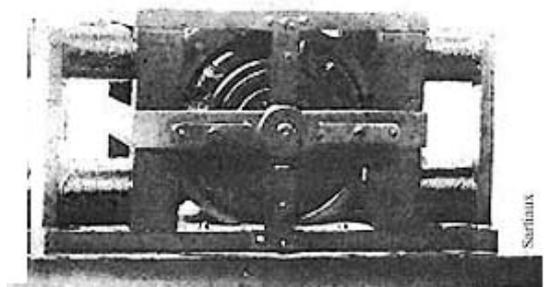
La machine soumise à l'Académie est précisément de ce genre ; elle présente deux électro-aimants, et par conséquent quatre pôles agissants sur l'anneau. Elle a quatre frotteurs, dont deux conduisent la moitié du



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

L'électricien averti remarquera plusieurs particularités :

La machine avait une originalité que Gramme avait empruntée à Wilde, puis à la machine de Ladd, et appliqué à des machines à plusieurs paires de pôle. Il y avait deux circuits induits indépendants, soit enroulés sur la même armature et débitant chacun sur un collecteur, soit enroulé sur deux anneaux juxtaposés sur le même arbre avec deux collecteurs. L'un, dont les inducteurs étaient en dérivation sur le collecteur de sortie, n'alimentait que les inducteurs du deuxième, ce dernier alimentait le circuit d'utilisation. Certains auteurs ont pensé qu'il s'agissait d'une machine quadripolaire, alors que ce n'était que deux machines bipolaires montées sur le même bâti avec le même arbre. L'intérêt était de pouvoir réguler plus simplement l'excitation de la machine principale en fonction de sa charge - problème qui ne se révélera important que plus tard. Au début, une machine n'alimentait qu'un seul groupe de lampes à arc ou de galvanoplastie ; cette disposition un peu compliquée de deux et même trois machines regroupée sur le même bâti n'était pas nécessaire. Gramme le reprendra dans certaines dynamos spéciales (zf) et en particulier pour ses dynamos à courant alternatif (ci-après). En 1881, Deprez et les fabricants de lampes trouveront des solutions semblables pour résoudre ce problème, à l'origine de l'excitation compound.

- Sur la gravure (y) le noyau de l'induit coupé est un assemblage de fils de fer. L'objectif est évident pour nous, supprimer les courants tourbillonnaires, de Foucault, mais c'est la première fois que l'on trouve cette solution sur une machine ; bien d'autres l'ignoreront à leurs dépens, jusqu'à Hefner Alteneck et Weston qui trouveront après maints déboires le circuit feuilleté, devenu classique de nos jours.

- Gramme précise bien un détail essentiel, que les frotteurs doivent s'appuyer sur deux lames du collecteur au moins, afin de mettre brièvement en court-circuit chaque section du bobinage induit. Il a dû constater que si ce n'était pas le cas, on retrouvait ces étincelles destructrices.

Tel fut l'acte de naissance de la lignée des différents types de machines, plus d'une dizaine, que Gramme développa pendant vingt ans, pour apporter une solution à chaque type d'alimentation électrique. En effet, son objectif n'était pas de construire une énième petite machine de laboratoire, mais des machines industrielles assez puissantes, adaptées aux besoins de l'époque, réduits encore à deux applications, l'éclairage à arc et la galvanoplastie.

Au début, la galvanoplastie se développait chez Elkington en Angleterre et Christofle en France, avec des batteries de piles (III-6). Elle nécessitait des machines à très basse tension en continu, une dizaine de volts mais avec de fortes intensités, la centaine d'ampères. L'autre était l'éclairage, dont le début dans les phares avait nécessité une machine Holmes ou Alliance de plusieurs tonnes pour alimenter une seule lampe à arc (III-1).

La fabrication

Ces ambitions imposaient de développer une véritable structure industrielle pour la fabrication. La Société des machines Gramme s'étoffait aussitôt avec Hippolyte Fontaine en tant que directeur, fonction qui n'intéressait pas Gramme.

Cet ingénieur, formé à l'école des Arts et Métiers de Chalon, avait fait son tour de France comme menuisier modelleur, le métier de Gramme, ce qui les a probablement rapproché ; à l'époque les ingénieurs commençaient par la pratique du travail manuel, pour mieux diriger et comprendre ensuite leurs ouvriers. Après divers emplois, il s'était lancé dans la fabrication de petits moteurs domestiques au gaz, source d'énergie mécanique plus pratique qu'un moteur à vapeur. La guerre de 70 avait interrompu cette activité et en 1871 son chemin a croisé celui de Gramme.

De fortes affinités ont réuni rapidement les deux hommes, dont les différences de tempérament se sont parfaitement complétées ; tous deux étaient cependant des modestes que les honneurs n'intéressaient pas, l'argent juste ce qu'il faut pour vivre et travailler sans souci, mais la passion de créer et fabriquer des machines utiles. Aucun des deux n'a cherché à dominer l'autre ; ils se portaient une estime mutuelle. Ils n'ont déclenché aucune série de procès « à l'américaine » contre tous leurs suiveurs qui les copiaient.

Il est indéniable que cette rare association du praticien-inventeur et de l'ingénieur-industriel s'est révélée très féconde pour la réussite qui suivit. En prenant la terminologie d'aujourd'hui Fontaine dirigeait l'administration, la fabrication, le marketing, la communication et surtout les relations extérieures que fuyait Gramme, solitaire, assez sauvage, responsable uniquement de la recherche et du développement des fabrications. Une complémentarité efficace.



za2 Hyppolite Fontaine et Zénobe Gramme 1895

Présentons cette rare photo du tandem Gramme-Fontaine, à qui le monde doit le décollage industriel de la production mécano-électrique d'électricité, attendue depuis des décennies. (za2)

Le démarrage de la Société Gramme fut facilité par la vente des brevets à une société anglaise pour 65 000 F et l'aide financière temporaire du Comte d'Ivernois, ancien administrateur des Docks de St Ouen où avait travaillé Fontaine.

Une certaine notoriété s'amorçait. La Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale annonçait dans son rapport de 1873, rédigé par le comte du Moncel, la remise d'un prix de 1000 F à H. Fontaine sur le concours d'un petit moteur destiné à un atelier de famille, où il avait présenté ce petit moteur à vapeur chauffé au gaz.

Gramme recevait 3000 F gagnés au concours pour la construction d'un appareil donnant un courant électrique constant (pile ou machine magnétoélectrique), dont la force électromotrice serait comparable à celle d'une pile à acide azotique de 60 à 80 éléments, présentant des supériorités, autant économiques, que de salubrité sur les appareils en usage aujourd'hui ».

À noter que le grand prix de 12 000 F, attribué tous les 6 ans, était décerné à l'académicien Pasteur pour ses études sur le vinaigre, le vin, la bière, leur fabrication, maladies et prévention, de même les maladies du ver à soie.

Pendant les premières années, les machines étudiées et mises au point par la Société Gramme ont été aussi fabriquées par différents constructeurs, Mignon-Rouart, et Bréguet. Un autre constructeur important, Sautter -Lemonnier, eut l'exclusivité des machines pour l'armée et la marine ; de même Jaspar, concitoyen belge de Gramme. Au total peut-être 6 à 8 licenciés à l'étranger.

Antériorités

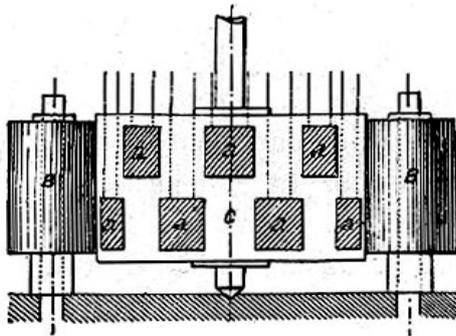
Peu de temps après la communication de Gramme en 1871, l'Académie recevait deux notes présentant des machines similaires ayant fait l'objet d'une réalisation ou d'un brevet antérieur. Ce n'était pas très surprenant pour un sujet de cette importance, dans l'air depuis des années, sur lequel nombre de chercheurs avaient échoué.

La machine de Pacinotti

Antonio Pacinotti, originaire de Pise, avait fabriqué vers 1860 alors qu'il était encore étudiant, une maquette d'un petit moteur électrique, dans le cabinet de physique de son père professeur (IV-1). Plus tard, devenu professeur à Bologne, il l'avait présenté dans la revue locale de l'université, *Il nuovo cimento*, de 1864, publiée le 3 mai 1865 (zb).



zb Machine de Pacinotti



zc Collecteur à galets de Pacinotti

Bien que ne l'ayant pas breveté en Italie, ni en France (11), il revendiquait dans sa note à l'Académie la priorité de l'électro-aimant tournant en forme d'anneau ainsi que la possibilité d'en faire un générateur à aimant permanent.

Si la structure mécanique, donc l'aspect était bien différent des machines de Gramme, le principe de base était identique. L'inducteur était constitué d'un électro-aimant à deux bobines dont les pièces polaires E E' concentraient le champ magnétique sur la périphérie d'un anneau de fer à axe vertical, portant 16 bobines. Ces bobines étaient toutes connectées en série et chaque jonction entre deux bobines était reliée à une plaquette d'un commutateur du genre de celui de Gramme, mais simplifié (zc). Il était constitué d'un cylindre de bois dans lequel étaient encastrées les 16 pièces reliées aux bobines. Les contacts avec le circuit d'utilisation étaient assurés par deux galets roulants en cuivre.

Il y avait dans la publication de 1865 (12) une description détaillée, les résultats des essais du moteur alimenté par des piles, ainsi que l'indication de pouvoir fonctionner aussi comme générateur de courant en l'entraînant à la main, réversibilité déjà constatée sur d'autres machines.

Par contre, il ne donne **aucune explication** sur les raisons qui l'ont amené à ce principe, ni pourquoi il utilisait sur un moteur un électroaimant, au lieu d'aimants permanents, solution classique qui aurait économisé l'énergie limitée des piles. A l'inverse, pourquoi en générateur propose-t-il des aimants permanents, alors que la solution des électro-aimants alimentés par le courant de la machine avait été trouvée depuis 1851 ? Ces deux propositions, sans être des erreurs, plutôt des incompréhensions, font supposer une relative ignorance du problème des machines.

Cette publication en italien, dans une revue à diffusion locale, était restée ignorée même dans le monde scientifique, essentiellement préoccupé par le développement spectaculaire du télégraphe ; aucune revue à diffusion plus générale, ni compte-rendu d'Académie ne l'avait signalée. La machine de Pacinotti ne fut découverte par les physiciens, ingénieurs et praticiens qu'à l'exposition de 1881, suite à sa présentation et des revendications de plagiat faites à la presse par les Italiens, et firent quelques remous (III-4). Le principal rédacteur de la Lumière électrique, Frank Géraldy, signale en 1885 qu'il l'a découverte dans un livre peu connu de 1879 (13).

Pacinotti, n'ayant probablement pas les qualités d'inventeur-développeur de Gramme pour se lancer dans la fabrication industrielle de sa machine, a dû chercher à la faire fabriquer en Italie, ou en Angleterre semble-t-il, sans succès. Il est alors venu à Paris en 1865 pour tenter d'intéresser le constructeur réputé d'appareils et de moteurs, Froment, auquel avait succédé Dumoulin. Il y aurait peut-être rencontré des habitués, Foucault ou son collaborateur de Romilly, mais dans cet atelier qui avait conçu sans succès les nombreux moteurs Froment, on ne fut pas plus convaincu par son intérêt qu'en Italie. C'était un énième moteur sans doute intéressant, mais sans utilisation pratique tant que l'on n'aurait pas une source d'électricité valable plus puissante que les piles. Quant à son fonctionnement en générateur, Pacinotti n'y voyait qu'un intérêt secondaire.

L'examen de la maquette de Pacinotti révèle pourtant **trois défauts**, dont deux rédhibitoires, interdisant son développement à des puissances plus élevées.

1 – L'armature, anneau en fer massif traversé par un champ alternatif, est le siège de courants tourbillonnaires, ou « de Foucault » pour les Français, provoquant des pertes par échauffement excessif du fer. Ce fut plus tard le cauchemar de nombre d'inventeurs de machines, Pour l'électricien d'aujourd'hui, c'est un problème banal, tous les circuits magnétiques soumis à un champ variable sont feuilletés.

Gramme, observateur réfléchi, avait bien remarqué sur la machine de l'Alliance cet échauffement excessif. Dès le départ, même sur sa petite machine, il avait évité de faire un anneau en fer massif plus simple, mais en fil de fer isolé (y), éliminant ces courants parasites. De plus l'induit sans encoches permettait au conducteur actif de canaliser plus efficacement le champ inducteur

2 – Sur le collecteur de Pacinotti (zc) le contact était assuré par des galets roulants qui ne pouvaient porter simultanément sur deux pièces, comme des frotteurs larges (z), ou balais, afin de mettre brièvement en court-circuit chaque élément de bobine. Cette disposition était impérative pour éviter les étincelles destructrices.

3 – La structure mécanique de la *machinetta* était vraiment trop artisanale pour être industrialisé à plus grande échelle. Cette machine devait être complètement redessiné par son concepteur ou un mécanicien industriel.

Gramme ne pouvait donc pas avoir copié la machine de Pacinotti, sinon il aurait reproduit les mêmes défauts (14).

En conclusion, Pacinotti avait inventé le principe d'une machine, meilleure que celles de son époque, mais défectueuse sur des points essentiels qu'il n'a pas perçu sur une maquette de laboratoire. Il s'était arrêté en chemin, mais pour l'industrialiser et monter en puissance il n'aurait pu que reprendre les solutions trouvées par son successeur.

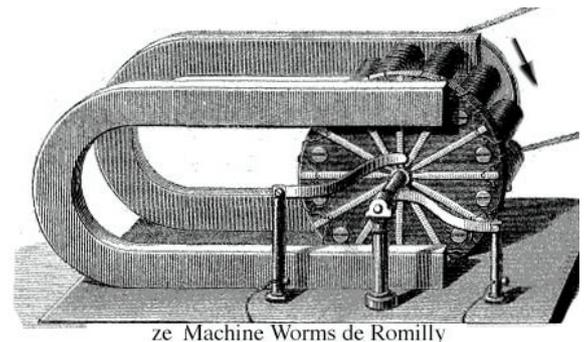
Gramme, avait lui retrouvé le même principe, mais l'avait appliqué sans défauts et industrialisable, après des années de réflexion et plusieurs prototypes. Il suffit de comparer les deux gravures (zb et zd) pour apprécier la différence. Cette coïncidence du même principe découvert indépendamment par deux hommes s'est rencontrée pour nombre d'inventions électriques, mais méritait d'être analysé, compte tenu de l'importance de cette première machine électrique industrielle recherchée depuis 40 ans.

La réussite des machines imaginées par Gramme ayant suscité des jalousies, les accusations de plagiat étaient à prévoir. D'ailleurs, sauf des protestations médiatiques en 1881, Pacinotti n'a pas contesté les brevets de Gramme devant la justice, seul moyen pour que son antériorité soit établie, ni fabriqué sa machine en Italie, ni en Angleterre où il s'était rendu.

Ce n'était suivant l'adage, ni la première ni la dernière fois dans l'histoire des techniques, qu'un inventeur s'arrête en chemin et se trouve ensuite dépassé par un autre, qui fait mieux, ignorant son prédécesseur.

La machine Worms de Romilly (ze)

L'Académie reçut une autre note, suite à celle de Gramme. Un inventeur parisien, Worms de Romilly, avait conçu une machine cylindrique, hybride entre celles de Clarke et de Gramme, dont il reconnaissait d'ailleurs la supériorité. C'étaient douze bobines connectées formant un enroulement sans fin dont les jonctions étaient reliées à un collecteur à frotteur.



ze Machine Worms de Romilly

Trois appareils auraient été fabriqués par l'atelier Froment - Dumoulin et présentés, le brevet avait été déposé, mais aucun compte-rendu de fonctionnement publié. Le seul examen de la machine faisait douter de son efficacité et l'on n'en parla plus. Il est possible que de Romilly, fréquentant l'atelier Dumoulin ait vu la machine que Pacinotti y avait présentée en 1865, et l'avait mal copiée.

Ces deux notes d'antériorités, ignorées du public, n'eurent guère d'écho même chez les physiciens et électriciens, Gramme, simple ouvrier chez des constructeurs, n'était pas encore connu, Romilly un peu mieux comme ami de Foucault et de Froment, Pacinotti pas du tout. Rares étaient les gens qui lisaient avec attention le millier de pages des comptes rendus annuels de l'Académie.

Ce n'était pas le tempérament réservé de Gramme de polémiquer, il n'y eut pas non plus de réaction à ces communications de son associé Fontaine.

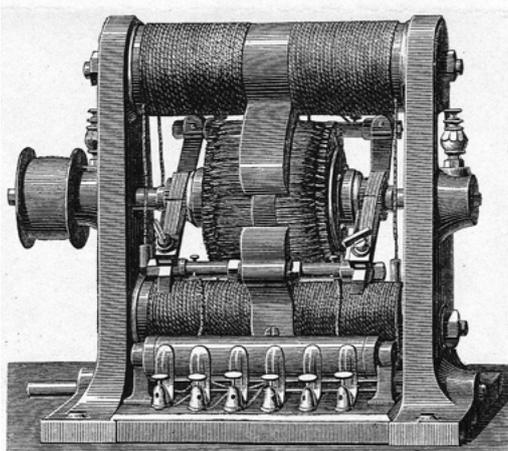
Au-delà d'une recherche de priorité sans grand intérêt pour la science, sinon la petite histoire, mais qui allait pourtant surgir à l'exposition de 1881, ces développements permettent de mieux comprendre les approches parallèles de ce problème, l'un des plus difficiles de l'électricité par des hommes différents à la fois par l'origine, l'expérience, le métier et l'objectif poursuivi.

Développement des machines Gramme

Ce ne fut pas le succès pendant deux ou trois ans, mais de sérieuses difficultés financières pour le démarrage de l'atelier de la petite équipe Gramme - Fontaine avec quelques ouvriers.

En 1872, n'avaient été encore construites que deux machines, l'une pour galvanoplastie et l'autre pour la lumière. Elles sont décrites dans une autre note à l'Académie du 2/12/1872. La machine pour galvanoplastie, haute de 0,8 m, pesait 400 kg et fonctionnait depuis 4 mois chez Christofle où elle donnait de meilleurs résultats qu'une machine de Wilde. Elle avait deux armatures et deux électros fixes, probablement la machine (zf) avec deux collecteurs. Une machine à galvanoplastie semblable (zg), datant de 1875, est conservée au musée de Munich ; elle fonctionna jusqu'en 1885 dans une raffinerie de Hambourg (10 V - 900 A - 500 tr/min).

Quelques détails originaux :



zf Machine Gramme à 2 inductifs



Zg Machine à galvanoplastie

– Les enroulements des inducteurs de ces machines devaient être de forte section, ils n'étaient pas en fils isolés, mais en rubans de cuivre de la largeur du noyau de l'électro.

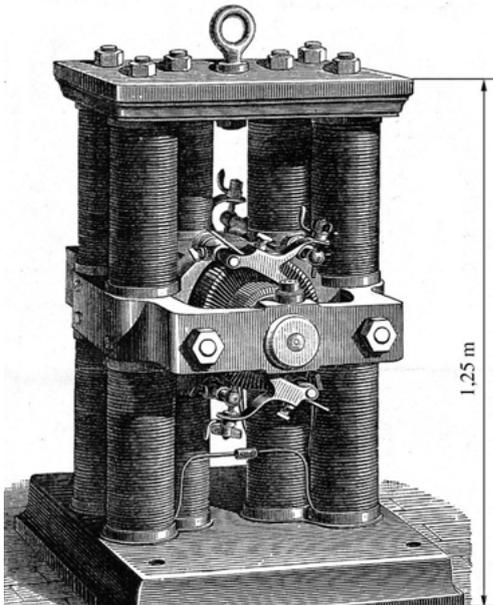
– À la première mise en service des machines à autoexcitation, il fallait « amorcer » le magnétisme rémanent en faisant débiter des piles sur l'enroulement pendant un

instant. Cette machine s'est amorcée toute seule, par le faible magnétisme terrestre.

– Les frotteurs, jusqu'ici des lames de cuivre arrondies à la forme du collecteur pour porter sur trois lames (sinon étincelles), sont remplacés par un grand nombre de fils maintenus par un lien qui leur donne la forme de pinceaux ou de **balais** plats. Ces balais ont été remplacés vers 1881 par les baguettes de **charbons** que nous connaissons aujourd'hui, dont la surface de recouvrement est plus

large qu'une lame de collecteur et le matériau résiste mieux aux étincelles. Ces charbons restent toujours désignés comme balais.

La machine à lumière, plus grosse, pesait une tonne et permettait d'éclairer un arc de 900 becs carcel. Elle avait trois électros inducteurs indépendants et trois induits dont deux servaient à exciter deux des inducteurs. (zh)



Machine Gramme à lumières
à 6 poles et 3 induits

Gramme profitait de la souplesse de sa conception technologique pour multiplier le nombre d'inducteurs et d'induits, regroupant ainsi deux ou trois machines dans une. Cela nous paraît une complexité peu nécessaire, qu'il abandonnât ensuite, pour la reprendre sur ses dynamos à courant alternatif.

Il fit encore deux notes à l'Académie en 1874 et 1877 et prit une douzaine de brevets jusqu'en 1884 avec l'aide probable de son associé Fontaine. En dehors de ces textes, il n'a laissé aucun écrit, ni jamais pris la parole en public.

Ce caractère assez sauvage suscita le mythe, exagéré par certains, du manuel inculte ayant eu de géniales intuitions, et ne fréquentant pas les cercles de savants. À l'occasion de la remise du prix de la Société d'Encouragement, le comte du Moncel soulignait en 1873 : « Toutefois, nous pouvons le dire, c'est surtout l'expérience et l'observation des effets produits dans les machines d'induction qui ont été pour M. Gramme le véritable guide de ses découvertes... ».

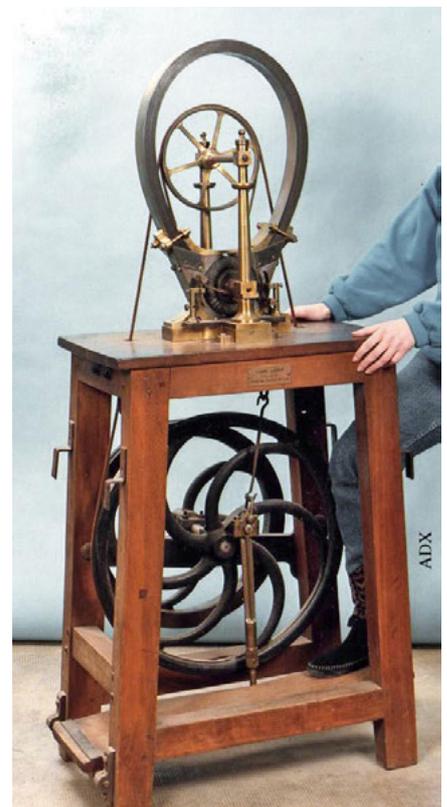
Très habile de ses mains, observateur sagace, Gramme savait simultanément faire fonctionner ses neurones. Il avait surtout trouvé un associé capable de développer et gérer une production industrielle et la commercialisation d'une technologie très nouvelle.

En 1873, Gramme et Fontaine construisent une nouvelle petite machine à aimant, sans doute sous l'impulsion du professeur J Jamin qui avait apporté de notables améliorations aux aimants permanents (zj). Cette réalisation, d'une esthétique originale, se situait dans la gamme, entre le modèle de laboratoire Bréguet et les grosses machines industrielles. Avec ce générateur actionné par un système de pédale, des amateurs ou petits ateliers sans machine à vapeur, ni moteur à gaz, pouvaient ainsi disposer d'électricité économiquement, l'équivalent de 8 à 10 piles Bunsen inusables, mais à condition de pédaler.

Remarquons ce souci constant des dirigeants de la société Gramme de « coller » aux besoins du marché potentiel, ce que nous croyons avoir découvert aujourd'hui, le marketing.

Réversibilité

Cette machine a été l'occasion de révéler deux nouveaux concepts : la réversibilité des machines à induction et surtout sa conséquence, le transport de Force.



zj Machine Gramme à aimants Jamin

La réversibilité, c'est un moteur pouvant tourner en générateur, ou l'inverse, propriété qui nous paraît importante aujourd'hui, ce ne fut pas le cas à l'époque.

Le tout premier générateur, le disque de Faraday, avait déjà démontré sa réversibilité avec son clone, la roue de Barlow, le premier moteur. Plusieurs constructeurs de petites machines l'avaient déjà signalé : –Jacobi sur son moteur de 1834 – la petite dynamo de Siemens de 1856 pouvait aussi tourner en moteur – Pacinotti indiquait en 1864 que son moteur pouvait être transformé en générateur – Gramme signalait lui aussi, dans son brevet de 1870, que son générateur tournait aussi en moteur.

On ne voyait pas bien l'intérêt qu'une machine transforme de l'énergie mécanique en électrique, pour qu'une machine identique la retransforme en énergie mécanique ; cela s'apparentait au mouvement perpétuel, en ignorant les pertes, On oubliait tout simplement que si ces deux machines étaient éloignées, l'énergie mécanique, la force, serait ainsi transportée et utilisée loin du lieu où elle était produite (15).

Une objection apparaissait, mais il suffit de transporter la génératrice et son moteur mécanique, normalement à vapeur, à l'endroit voulu, s'il y a du charbon ; mais comment faire si ce moteur était une turbine hydrau-lique ? Problème de la décennie suivante.

Une expérience de réversibilité avait été faite par G.Planté et A.Niaudet pour démontrer l'intérêt de l'accumulateur, sorte de pile rechargeable (16).

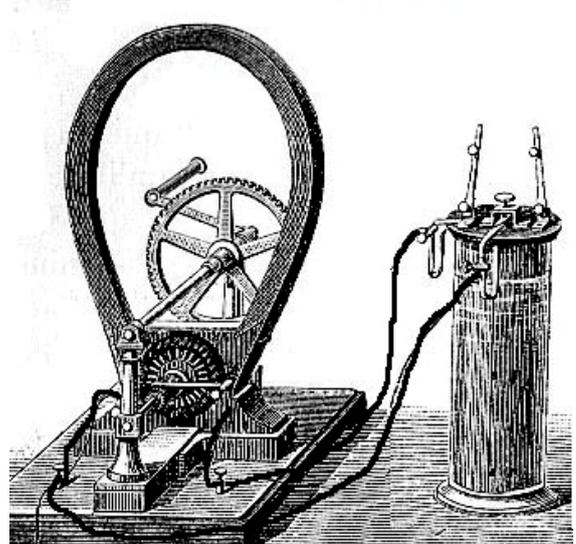
Un accumulateur et une machine à aimant Jamin étaient connectés (zk). L'accu étant chargé par la machine manœuvrée à la main, si on l'arrête sans retirer le fil, elle se met à tourner en moteur, alimentée par l'accu devenu générateur. L'intérêt de l'expérience était purement pratique, la même machine pouvait fonctionner soit en moteur, soit en générateur. Curieusement elle tourne toujours dans le même sens ; pourquoi pas en sens inverse comme le voudrait le bon sens ? Petite devinette pour stimuler les neurones du lecteur sagace, en retournant aux forces motrices d'Ampère et à l'induction de Faraday.

Fontaine comptait faire une expérience semblable à l'exposition universelle de Vienne en 1873 (17), avec un accu ou une pile. Sa machine à aimant, tournant en moteur, devait actionner divers appareils dont une pompe. Un peu plus loin, il y avait une grosse machine pour galvanoplastie entraînée par un moteur à gaz pour éclairer une lampe à arc de phare... qui n'était pas arrivée, donc la machine était disponible.

Un ingénieur français qui passait, C. Félix, lui suggéra : « Puisque vous avez une première machine qui produit de l'électricité et une seconde qui en consomme, pourquoi ne pas faire passer directement l'électricité de la première à la seconde et supprimer votre pile ou accu? Vous auriez une double transformation du mouvement en électricité et de l'électricité en mouvement. Votre exposition serait beaucoup plus intéressante.»

Fontaine emprunta du fil à un exposant voisin, Manhès de Lyon, et connecta les machines avec 250 m de fil. La machine à aimant tournait si fort que la pompe entraînée projetait trop d'eau, il rajouta du fil plusieurs fois pour augmenter la chute de tension, au total 2 km, pour avoir un fonctionnement normal, la génératrice étant beaucoup trop puissante.

La réversibilité était mise en évidence d'une façon spectaculaire, mais c'est surtout sa conséquence directe qui n'était pas encore venue à l'esprit de personne : l'électricité peut transporter la force à 2 km.



zk Echanges d'énergie entre accu Planté et machine Gramme

Ce sera le challenge qui agitera la décennie suivante, pour transporter une énergie intransportable, à consommer sur le lieu même de sa production, l'énergie hydraulique des turbines. Jusque-là, la réversibilité d'une machine était une simple satisfaction intellectuelle et pratique.

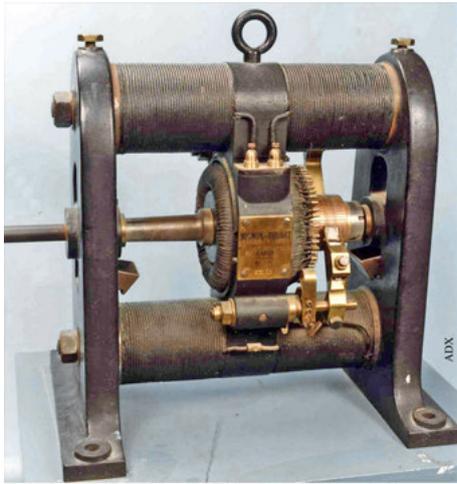
Quelques récits de l'évènement de Vienne l'ont pimenté en y ajoutant la version d'une panique de Fontaine qui, à l'arrivée imminente de l'Empereur d'Autriche devant son stand, n'arrivait pas à faire fonctionner sa petite machine sans pile ni accu chargé. Il aurait eu, par hasard, cette idée de génie d'utiliser la grosse machine pour faire tourner la petite avec un câble emprunté, découvrant ainsi la réversibilité et le transport de Force.

Fontaine a laissé courir cette version, en 1873 il avait besoin de publicité pour lancer sa société Gramme. La version réelle ne fut donnée par Félix qu'en 1886 (18).

Début d'industrialisation

Pour la Société Gramme, les années qui suivirent furent celle d'un difficile décollage. Sans compter les machines de laboratoire fabriquées par Bréguet et quelques machines de présentation ou mise en essai chez de futurs clients (Christofle, phares), le nombre de machines vendues fut de 4 en 1874, 12 en 1875, 85 en 1876, 350 en 1877, date d'apparition, sur ce marché, d'un concurrent sérieux, Siemens. S'ajoutent à ce chiffre les machines fabriquées par des partenaires, chez Mignon et Rouart, Jaspas à Liège ou Bréguet. Puis ce fut le succès avec un total de 3000 machines vendues à l'ouverture de la grande exposition de 1881.

Le modèle le plus courant, lancé en 1873, était le type normal ou **d'atelier** (zl). Ses caractéristiques étaient : hauteur 0,6 m - largeur 0,65 m - poids 180 kg, dont 32 kg de cuivre - puissance 2 kW à 900 tr/min - tension adaptée à l'utilisation ainsi que l'excitation shunt ou série.



zl Type d'atelier - fabrication Mignon-Rouart

Un modèle plus puissant, pesant 700 kg était fabriqué pour l'éclairage des navires, à partir de 1876. En 1878 le type octogonal fut créé pour le transport de force (zm), ainsi que la machine type 5 lumières qui éclairera le grand hall de l'exposition.

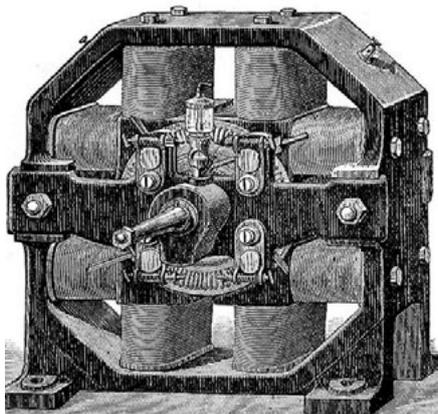
La gamme de 1879 comprenait 3 modèles du type d'atelier, dont les prix s'étagaient de 2000 à 9000 F, leur rendement atteignait 80 à 90 %.

A l'ouverture de l'exposition de Paris, en 1881, tournaient 3000 machines *d'atelier*. En 1888, 15 000 machines tournaient dans le monde.

D'autres modèles furent mis en service après l'exposition. L'un d'eux avait un induit en forme de disque au lieu de l'anneau, l'une des solutions envisagée dans le brevet initial de 1869, mais pas encore essayée.

La concurrence

Au cours de la décennie 1870, il était à prévoir que d'autres se lanceraient aussi dans cette aventure. En France, **Lontin** conçut dès 1874 une curieuse machine courant continu à 10 pôles, puis une dynamo alternative à 24 pôles. **Méritens** perfectionna sensiblement la machine de l'Alliance pour alimenter des arcs en courant alternatif, de même Wilde en Angleterre.



zm Machine Gramme octogonale

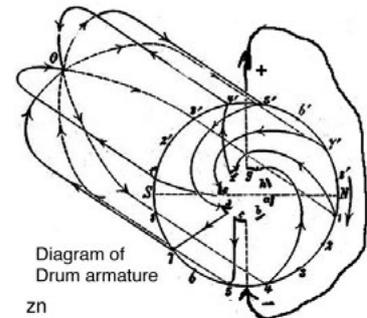
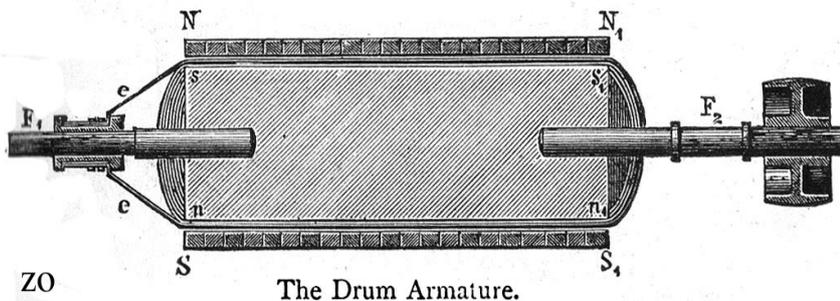
En Amérique **Wallace et Farmer** fabriquent dès 1879 une mauvaise copie de la machine de Gramme, puis **Brush, Maxim et Weston** pour leurs systèmes d'éclairage. Les machines **Thomson-Houston** avaient des dispositions originales. Ces diverses machines souvent intéressantes n'apportaient pas de sensibles progrès, pour qu'on s'attarde à leur analyse.

Cependant, dès 1872 en Allemagne, s'élaborera en plusieurs années la machine Siemens, qui supplantera à terme les machines Gramme.

La machine à tambour de Alteneck

La Société Siemens et Halske, l'une des plus importantes dans le domaine du transport de l'information par le télégraphe en pleine expansion, allait pénétrer dans le domaine de l'énergie grâce à l'initiative d'un jeune mécanicien embauché en 1867, Friedrich von Hefner Alteneck, futur ingénieur en chef (19).

Stimulé par l'apparition du premier modèle de Gramme, il chercha à adapter à l'ancienne armature Siemens de 1856, en double T ou H portant une seule bobine, le principe de Gramme à bobines multiples. Reliées en série, elles constituaient un bobinage sans fin, enroulé sur une longue armature en fer cylindrique, le tambour, *Trommel anker* ou *drum armature* suivant la langue (zn).



Chaque jonction entre deux bobines était reliée aux lames d'un collecteur genre Pacinotti sur lequel le contact était assuré par des galets roulants. Le tambour (zo) était un cylindre en acier dans lequel étaient emmanchés les demi-axes.

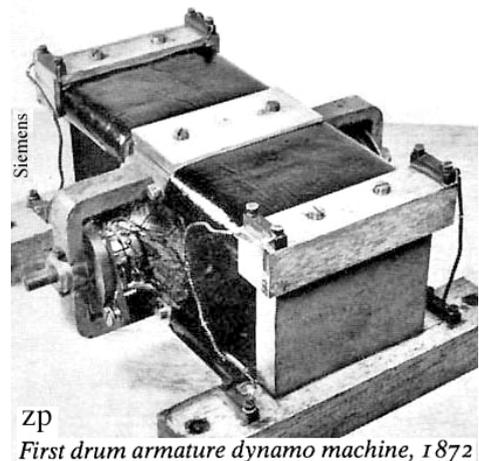
Cette disposition avait l'avantage que la totalité du fil induit était soumise au champ magnétique inducteur, alors que dans l'anneau, la moitié intérieure du fil n'était pas soumise à ce champ, le noyau de fer jouant alors le rôle "d'écran magnétique". C'est cet avantage qui entraîna, à terme, la disparition de l'anneau Gramme au profit du tambour Alteneck-Siemens, mais après de laborieuses mises au point, en particulier sur la méthode d'enroulement du fil induit sur le tambour, assez complexe.

Résolution des problèmes

Ce premier modèle fut exposé à l'exposition de Vienne en 1873 (zp), suivi d'autres prototypes pendant plus de 5 ans pour chercher à résoudre deux problèmes :

– Le premier était que ce cylindre magnétique soumis à un champ alternatif s'échauffait au point d'endommager rapidement l'isolant des fils du bobinage. Décidément ces courants d'induction, dits de Foucault, qui nous paraissent aujourd'hui classiques ont fait transpirer les électriciens du XIX^e siècle.

– Le second était l'apparition d'étincelles destructrices au collecteur, maladie trop bien connue, résultant à la fois des galets roulants du collecteur et de dissymétries de l'enroulement (zn).



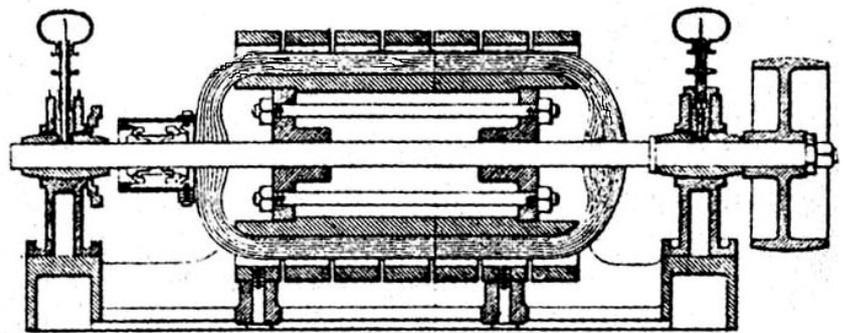
Alteneck essaya d'abord de refroidir le tambour par de l'eau, avec les difficultés pratiques que l'on suppose. Ensuite le tambour en acier fut remplacé par du bois sur lequel était enroulé le bobinage, la machine perdait alors beaucoup de puissance.

Une autre solution consista à enrouler le bobinage sur un tube creux en *german silver*, un alliage de cuivre nickel et zinc, le tube tournant était supporté par demi-axes dont l'un portait le collecteur, et au milieu se trouvait un noyau en acier fixe qui chauffait moins, étant soumis à un champ alternatif plus faible. Une variante a été de remplacer le noyau massif par des tiges de fer.(zq)

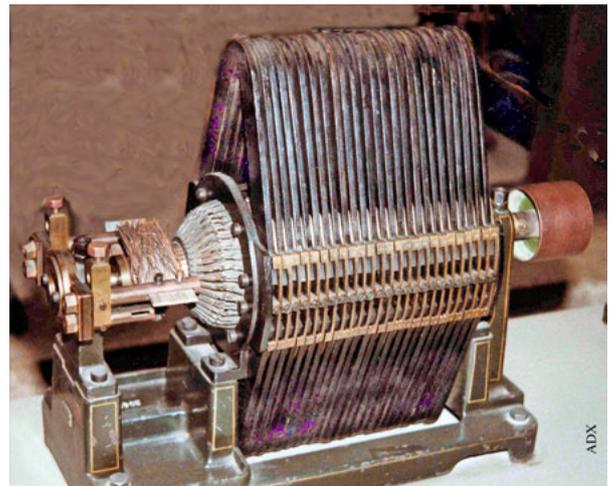
Mais ce bobinage cylindrique tournant entre l'inducteur et le noyau central fixe était mécaniquement délicat à réaliser et fragile.

Une solution acceptable fut adoptée en 1877 et la commercialisation débuta. Mais la solution définitive, toujours actuelle, ne fut trouvée que plus tard par Weston : un empilage de tôles minces circulaires isolées et enfilées sur l'axe, ce fut le circuit magnétique feuilleté, procédé universellement adoptée aujourd'hui dans toutes les machines tournantes, comme dans les transformateurs.

Le deuxième problème fut résolu par différentes méthodes d'enroulement, assez complexes, proposées par l'américain Sprague, l'austro-hongrois Frölich et finalement le Français Antoine Bréguet dans une étude de 1879, publié en 1880. Mais surtout, les galets assurant les contacts sur le collecteur furent remplacés par des balais larges type Gramme (zr), permettant la mise en court-circuit fugitif de chaque bobine induite,



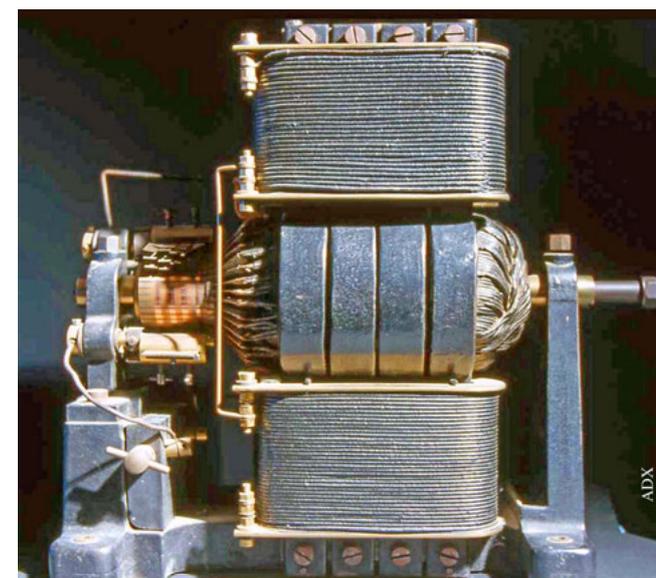
zq -Details of the Siemens and Halske dynamo of 1876



zr Machine à aimants Siemens - Trommelanker

supprimant ainsi les étincelles. Après les années de mises au point, les machines Alteneck - Siemens furent construites et essayées en particulier en Angleterre, chez Highs et Brittle, pour la filiale anglaise Siemens dirigé par l'un des frères, Wilhelm.

Des essais comparatifs faits par le professeur Hopkinson sur les modèles de 1877 et 1878 montraient que les machines Gramme avaient un meilleur rendement que les Siemens, elles furent améliorées par la suite. Cependant il s'en vendit en deux ans pour 60 000 £.



zs Machine Siemens, petit modèle

La fabrication commença lentement en 1877 avec deux modèles, dont les inducteurs étaient soit horizontaux pour le grand, soit verticaux pour le petit (zs). Une variante à inducteur par aimant permanent figure aussi au Deutsches Muséum (zr).

Elles n'auront pas au début autant de succès que celles de Gramme, mais seront aussi beaucoup plus copiées, en particulier par Edison.

Anneau ou tambour ?

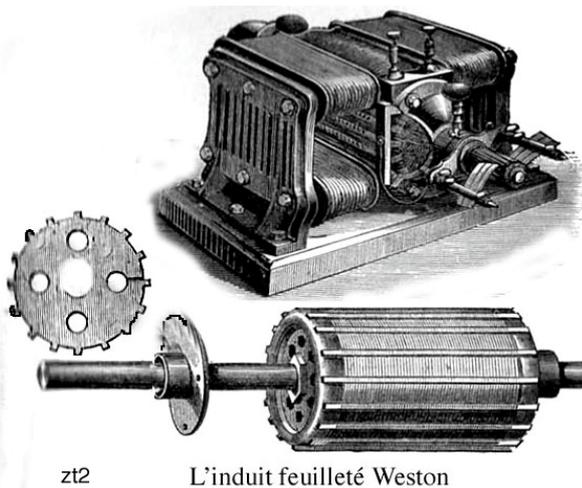
Des deux types d'induits, anneau de Gramme et tambour d'Alteneck amélioré par Frölich, puis Breguet et Weston, c'est le tambour qui seul subsistera, bénéficiant d'avantages techniques et économiques.

En effet, par rapport à l'induit en tambour Siemens, l'anneau Gramme avait trois inconvénients :

- une réaction d'induit plus élevée, gênante dans certains fonctionnements
- une partie du fil d'induit a une longueur inutile, son retour à l'intérieur du noyau
- le bobinage ne peut se faire que manuellement.

Sur un induit du XX^e siècle (zt) les fils du bobinage sont encastrés dans l'armature feuilletée en tôles d'acier et maintenus par des frettes circulaires isolantes, suivant une technique initiée par Weston. (zt2)

Ces deux machines ne resteront pas longtemps seules sur le marché qu'elles avaient créé.



Avec l'exposition de 1881, ce sera une pléthore de modèles, des copies parfois moins performantes. Ces deux inventions fondamentales, collecteur de Gramme et tambour de Siemens furent copiés par tous. Le brevet n'apportant en Europe qu'une protection très relative, il n'y eut pas de procès comme en Amérique. D'ailleurs, il ne semble pas que Siemens ait breveté son tambour, qui n'était que l'extrapolation de son induit en H de 1857, à une seule bobine.

Ce tambour fut copié dans la majorité des machines produites après 1880. Toutes ont copié le collecteur de Gramme.

L'exposition de Philadelphie - 1876

Fontaine traversa l'Atlantique avec du matériel pour se rendre comme exposant à cette grande manifestation américaine qui commémorait le Centenaire de l'Indépendance des Etats-Unis. Elle effaçait le souvenir de la fratricide guerre de Sécession, et affirmait la volonté et la capacité du nouveau monde d'égaliser le développement industriel de l'ancien :

« ... Je représentais M. Gramme et j'exposais dans la galerie des Machines : 1° une dynamo à lumière type normal alimentant un régulateur Serrin fonctionnant tous les jours avec une grande régularité ; 2° deux machines à lumière plus puissantes...destinées aux places fortes et navires de guerre ; 3° une machine à galvanoplastie ; et 4° un transport de force motrice composé d'un petit moteur à vapeur, de deux dynamos (une génératrice et une réceptrice) et d'une pompe centrifuge.

Il n'existait pas d'autre éclairage électrique, pas d'autre transmission électrique dans la galerie des machines, ni dans les autres parties de l'exposition, ni même dans tous les États-Unis. » Il ignorait la machine Wallace-Farmer de 1876, inspirée par celle de Gramme.

« Le gouvernement américain m'acheta tout mon matériel, et les futurs inventeurs du nouveau monde purent étudier à loisir les dynamos Gramme, arrivées déjà à un haut degré de perfection.

Douze ans après, en août 1888 (date de cette communication), il y avait aux États-Unis 5531 installations d'éclairages électriques, exigeant une force motrice de 459 000 chevaux et alimentant 192 000 lampes à arc et 1 925 000 lampes à incandescence....

Et tout cela, moins de 18 ans après l'exécution, par M.Gramme de la première dynamo industrielle...Les installations de force se comptaient par milliers... »

Un beau cadeau technique et économique de l'ancien monde au nouveau, démontrant la fantastique capacité et rapidité de réaction de l'industrie américaine naissante, devenue légendaire au siècle suivant. À peine cinq ans plus tard, les machines Brush, Edison, Maxim, Thomson envahirent l'exposition de 1881 à Paris. (20)

Dynamos à courants alternatifs

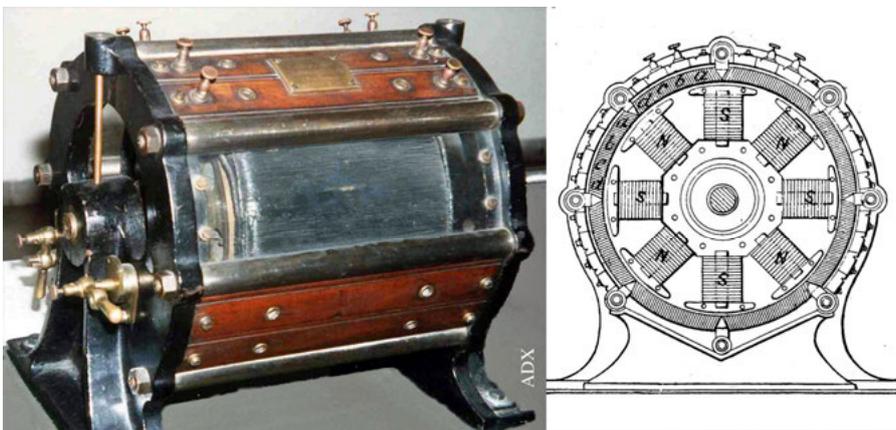
La principale utilisation des dynamos Gramme était l'éclairage par arc, en courant continu, bien que les premiers éclairages de phares avec la machine de l'Alliance, puis celle de Méritens, s'étaient adaptés au courant alternatif sans problème. L'arc électrique nécessitait néanmoins d'être produit et contrôlé par un mécanisme assez compliqué, le régulateur, dont il existait de nombreux modèles, dont l'un fabriqué par Gramme et un autre, plus perfectionné par Siemens.

En 1876, un ancien officier russe, Paul Jablochhoff mit au point chez Bréguet un nouveau système de lampe à arc très simple, sans régulateur, mais qui ne pouvait fonctionner qu'en courant alternatif. Pour faire fonctionner cette *bougie électrique* (III-1), qui connut un rapide succès en 1877, il n'y avait que la machine Méritens à courants alternatifs, de technique ancienne.

Gramme

Aussitôt, en moins d'un an, il conçoit une machine originale répondant au problème. Il aurait pu tout simplement modifier une machine à courant continu, en remplaçant le collecteur par deux bagues recueillant le courant alternatif qui se développe naturellement dans l'induit. Pour différentes raisons, dont la « division » de la lumière, il était préférable d'alimenter ces bougies par plusieurs circuits indépendants. Cette **dynamo à courants alternatifs** (dénommée alternateur seulement vers 1895) reprenait les idées de son premier brevet de 1867, regrouper plusieurs machines en une seule, de plus l'induit redevient fixe et c'est l'électro-aimant inducteur qui tourne, entraîné par le moteur mécanique, ce qui permet une conception technique des circuits magnétiques plus efficace que celle des machines

précédentes (zu). C'est exactement celle de nos alternateurs, avec en plus une singulière originalité, il y a 4 machines en une seule, 4 induits indépendants a, b, c, d sur ce que nous appelons le stator, avec 4 couples d'aimants inducteurs K sur le rotor. On remarque les couples de bornes pour le raccordement aux 4 circuits extérieurs de bougies



zu Dynamo Gramme à courants alternatifs avec 4 enroulements - 1878

Gramme avait réalisé, sans l'utiliser comme tel, le premier alternateur polyphasé à quatre phases, tétraphasé, mais l'exploitait comme quatre alternateurs indépendants, sans relier en un point commun l'une des extrémités de chaque phase, ce que nous appelons le neutre. Cela n'avait pas d'intérêt pour l'exploitation concernée.

A noter que ce premier alternateur précède de 10 ans ceux proposés en diphasé par Tesla en Amérique. Il est considéré là-bas comme « l'inventeur de l'alternatif ». (IV – 2)

Une fois encore, on est frappé par cette aptitude de Gramme et Fontaine à concevoir rapidement une nouvelle machine répondant à un nouveau problème, avec une solution élégante, encore actuelle un siècle plus tard

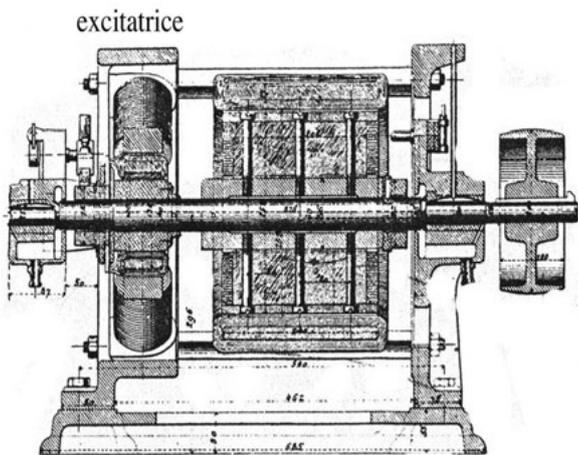
S'il fallait trouver un inventeur de l'alternateur, Gramme serait très bien placé, dans le sillage de Pixii. Il paraît surprenant que personne n'ait jamais contesté à Gramme cette invention, qu'il n'ait pas songé à breveter ni à revendiquer. La raison en était simple, le courant alternatif était considéré comme un courant atypique, sans grand intérêt, si ce n'est pour alimenter ces bougies Jablochhoff.

Il faut cependant reconnaître que l'alternateur, sans le collecteur-redresseur de la dynamo à courant continu, est une machine simple. Mais alors pourquoi ne pas y avoir pensé plus tôt ? Réponse au chapitre IV-2.

Trois modèles ont été construits, 4, 6 et 16 ch alimentant une bougie ou arc par cheval. Le plus petit représenté, long de 0,55 m, pesait 190 kg et coûtait 2 500 F.

Cette machine sera construite uniquement par la **Société l'éclairage électrique**, constructeurs des bougies Jablochhoff. Quelques années plus tard, quand l'alternatif prendra toute son importance, Fontaine - Gramme ne réaliseront pas leur avance dans ce domaine et laisseront d'autres occuper cet important futur marché de l'alternateur. Ce fut une grave erreur commerciale.

Un alternateur a besoin d'un générateur de courant continu pour alimenter ses inducteurs. Cette petite dynamo, n'existant pas dans la gamme, était achetée chez Siemens. La nécessité de faire entraîner simultanément par le moteur deux machines était une gêne pratique. Une nouvelle idée originale de Gramme fut tout simplement d'intégrer la petite dynamo d'excitation à l'intérieur de celle à courants alternatifs, sur le même arbre – elle devint alors **autoexcitée** (zv). Disposition préfigurant



Dynamo à courants alternatifs avec autoexcitation 1879

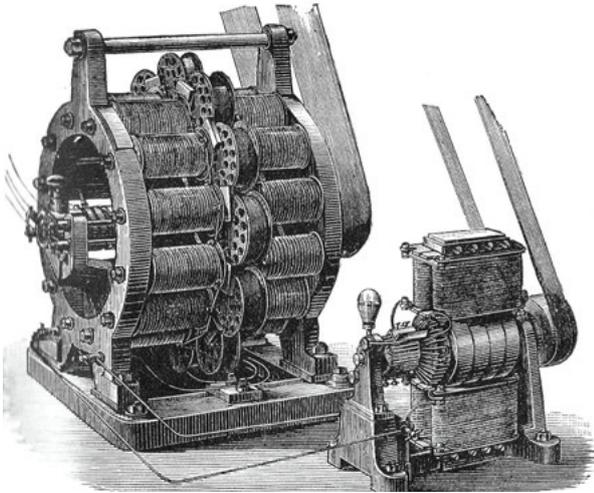
les alternateurs modernes ayant souvent l'excitatrice en bout d'arbre. En fait cette idée n'était pas nouvelle pour Gramme, il l'avait déjà appliqué dans sa machine de 1871 intégrant deux machines, l'une générant le courant d'excitation alimentant les inducteurs de l'autre. Solution alors sans grand intérêt pour le courant continu, puisqu'il suffisait d'alimenter les inducteurs avec une partie du courant de la machine principale.

Deux types de puissance étaient construits : le petit modèle de 4 ch pour 12 bougies (280 kg) et un modèle de 8 ch pour 24 bougies. D'après une statistique de 1884, 1000 machines avaient été vendues par Jablochhoff.

Siemens-Alteneck cherchait à rattraper l'avance de Gramme et réalisa aussi une dynamo à courants alternatifs, ou machine à division, selon la terminologie désignant les machines pour l'alimentation de plusieurs groupes d'arcs en série.

Sa conception reprend, en l'améliorant, la technique des anciennes machines, Clarke et Alliance (zw) ; les inducteurs fixes sont constitués de deux couronnes de douze électros concentrant leur champ magnétique sur douze bobines induites, disposés à la périphérie d'un disque tournant central. Ces

bobines sont enroulées sur un axe en bois et calées entre deux joues percées de trous assurant leur refroidissement.



zw Siemens' Alternating current Machine

En effet, le constructeur restait obsédé par l'échauffement prohibitif de ses inducts à tambour. La machine aurait été beaucoup plus efficace avec des noyaux magnétiques au cœur des bobines, mais pour éviter les courants de Foucault, il fallait prendre la technologie de l'induit de Gramme, des fils de fer isolés.

Le courant continu des inducteurs est produit par la petite dynamo placée à côté.

Cet alternateur était destiné à l'alimentation d'un régulateur à arc "différentiel", modèle perfectionné par Siemens. Le système, décliné en deux puissances, se vendit bien en Allemagne et en Angleterre, où la filiale était dynamique, mais sa conception était moins rationnelle que celle de

Gramme et disparut, remplacée par une technologie plus efficace.

En France, le système concurrent Gramme - Jablochkoff bénéficiait de la préférence nationale.

La longue histoire des générateurs électro-mécaniques ne s'arrête pas là, à la veille de l'exposition de 1881, mais leur invention est pratiquement terminée, ensuite ce seront des perfectionnements et accroissements de puissance par les différents constructeurs nationaux.

Ni Gramme, ni Siemens n'ont pressenti que leurs dynamos à courants alternatifs, simple solution à un problème particulier, allaient supplanter en une dizaine d'année la reine de la prochaine exposition internationale de 1881, la dynamo à courant continu.

Le courant alternatif, découvert par Pixii et Ampère, mais vite remis au placard, puis redécouvert discrètement une première fois avec les machines de l'Alliance, pour les arcs électriques des phares, puis les bougies Jablochkoff, attendait toujours qu'on reconnaisse ses avantages, particulièrement l'incontournable transformateur (IV-3).

Il faut, dit-on, laisser du temps au temps, en technique comme dans tout domaine..

Épilogue (1832 - 1880)

Après tout événement important, politique ou scientifique, en l'occurrence l'invention capitale des générateurs d'électricité électro-mécaniques, il est tentant d'épiloguer :

Pourquoi ces cinquante années de recherches et laborieuses expériences, aboutissant à la solution la plus difficile et complexe de la dynamo à courant continu, alors que la plus simple était celle de l'alternateur, accessible et abandonnée dès le départ ?

Il a été suggéré que ce va-et-vient du fluide électrique dans les fils rappelait trop aux gens de l'époque le halètement alternatif des pistons de la machine à vapeur, qu'il fallait ensuite transformer mécaniquement en rotation continue des roues de la locomotive.

Ou plus sommairement : Pourquoi faire simple, alors que c'est si simple de faire compliqué.

Ou bien, revenons à la réflexion de Heidegger, citée au début du livre : « L'essence de la technique n'est rien de technique, c'est le fonctionnement mystérieux du cerveau humain. »

Les scientifiques et les techniciens devraient donc étudier leur auto-psychologie, pour mieux piloter leur machine à inventer, le cerveau.

Compléments

1 - Uri Zebstein - Que sont donc devenues les machines de Pixii? Revue générale d'électricité, t. 88, n° 1, janv. 1979. L'auteur, ingénieur, a écrit une dizaine de livres de réflexion sur des sujets techniques et l'interaction entre société et techniques.

2 - Nicolas Constant **Pixii** (1776-1861) était fabricant d'appareils scientifiques à Paris, d'abord 2 rue de Jardinot, près de la Sorbonne, puis 18 rue de Grenelle St Germain.

Les machines évoquées étaient construites par Pixii, père et fils. Ce dernier (1808/1835) est mort jeune. Le texte Nouveaux appareils électromécaniques de Pixii, communication à l'Académie de novembre 1832 est accessible sur URL : gallica.bnf.fr

3 - Grâce à la diligence du colonel américain Behn, probablement amateur d'histoire et de patrimoine scientifique, eu lieu en 1947, juste après WW2, un intéressant échange franco-allemand entre deux musées. Il fit faire une copie de la table d'Ampère, conservée à l'origine au Collège de France, qui se trouvait alors au Deutsches Museum de München, pour le musée Ampère de Poleymieux (à côté de Lyon) qui ne possédait pas cette pièce majeure dans ses collections. En échange, une copie de la machine de Pixii à Poleymieux a été réalisée pour le musée de Munich.

Le *musée Ampère* appartient à la S.E.E., Société des Électriciens et Électroniciens. Sa collection d'objets et machines électriques est sans doute l'une des plus riches de France, avec celle du CNAM à Paris. Le Deutsches Museum est le plus ancien musée technique d'Allemagne, peut être le plus important du monde.

Où sont conservées des machines de Pixii ?

En plus de ces deux machines, au musée Ampère et au musée de Munich, j'en ai répertorié 5 autres : une machine à commutateur, construite par Pixii, au musée des Télécommunications à Lyon – une à commutateur, Ducretet, au CNAM, Musée des Arts et Métiers de Paris – une à commutateur, au Lycée Louis le Grand à Paris – une à bascule, au Museo di Storia della Scienza de Florence – une à bascule, au Science Museum de Londres – une à commutateur, au American History Museum, Smithsonian Institution de Washington. En raison de l'importance technique et historique de ce premier générateur électromécanique au monde, un recensement international avec photos de ces machines serait une initiative heureuse. Quel musée ou organisme l'entreprendra ?

4 - Cette idée de Nollet a été redécouverte par les nouveaux **promoteurs de l'hydrogène, vecteur d'énergie**. Ils reprennent le vieux rêve d'un véhicule électrique alimenté par une pile à combustible, nom moderne de la pile à gaz de Grove, fonctionnant avec l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau. L'électricité ainsi obtenue après deux transformations, n'est plus que 30% de celle qui a produit l'hydrogène.

Aujourd'hui, pour produire cette électricité primaire la solution la moins onéreuse serait le nucléaire, ou encore l'éolienne, d'une valeur réelle d'usage faible par son intermittence aléatoire, mais non-pénalisante pour stocker de l'hydrogène (II-5).

Il faut ajouter les problèmes, coût et surtout danger élevé du stockage, du transport et de la distribution, peu compatibles avec le principe de précaution, qu'on invoquera aux premiers accidents mortels. Le gaz tue, en France, déjà 400 personnes/an. Quel serait le chiffre avec l'hydrogène ? Ce gaz, le plus léger, fuit très facilement, rendant complexes tous les joints de raccordement.

Les médias rappelleront le syndrome Hindenburg, l'incendie du zeppelin à l'atterrissage à New York en 1937, son huitième voyage transatlantique. Il fit 35 victimes et signa l'arrêt définitif de ce mode de transport. Plus aucun ballon ou dirigeable ne sera depuis gonflé à l'hydrogène, uniquement à l'hélium (cher) ou à l'air chaud.

5 - Le **nom de dynamo-électrique** a été ensuite réduit à dynamo, devenu le terme générique de tout générateur, même en alternatif, puis réservé aux seuls générateurs de courant continu à la fin du siècle, après l'adoption du terme alternateur. À une exception près, la dynamo de vélo qui est en fait

un alternateur magnétoélectrique. De même cette dynamo-alternateur, dénommé aujourd'hui magnéto, équipe aussi tous les petits engins à moteurs à essence, sans accumulateur, pour l'allumage des bougies et la lumière. Le vocabulaire a toujours du mal à s'adapter à l'évolution des techniques !

6 - Ce n'est pas tout à fait exact, il serait possible de **couper un courant exactement à son passage à zéro**, à chaque demi-alternance du courant alternatif, avec une simple diode à semi-conducteur, ou mieux un composant plus élaboré, le transistor de puissance, le triac ou le thyristor. Malgré d'importants efforts de recherche, nous n'y sommes pas encore parvenu (V-7, c4).

7 - Le plus connu en français est le **Traité de Physique** de A.Ganot, destiné aux élèves des Lycées et écoles scientifiques, édité une vingtaine de fois depuis 1861. Il succédait à celui de M.Pouillet, édité une dizaine de fois depuis 1828. Étaient aussi classiques celui de Drion et Fernet de 1858, celui de Boutan et d'Alméida de 1851. S'y ajoutait celui de J. Jamin de 1870, etc.

Ce sont dans ces organismes, tel le Conservatoire des Arts et Métiers, hors de l'université, que les nouveaux électriciens comme Gramme apprenaient les techniques nouvelles. En effet, tout au long du XIX^e siècle jusqu'à WW2, leur enseignement et recherches ont fait naître en France des Instituts de recherches et Écoles d'ingénieurs, spécialisées dans les techniques et métiers qui apparaissaient avec la révolution industrielle, tel le bien connu Institut Pasteur, et plus récemment encore le C.E.A., Commissariat à l'énergie atomique.

Depuis la fin du Moyen Âge, **les universités françaises** considéraient que leur rôle se limitait à l'enseignement du savoir traditionnel, essentiellement pour former les professeurs. La formation aux métiers nouveaux, ingénieurs et techniciens, agronomes, biologistes, conduite des entreprises a ainsi nécessité la création de nouvelles structures d'enseignement et de recherches, suite à la carence de l'Université ne s'intéressant qu'à la culture traditionnelle, scientifique, littéraire, juridique ou médicale.

Depuis quelques décennies, l'Université française tente tardivement de faire sa mutation vers la formation aux métiers scientifiques, techniques et industriels, mais inhibée sous des siècles de tradition statique, il lui faut changer structures, méthodes, organisation et surtout mentalité. Ce n'est certes pas facile. On y jalouse périodiquement la réussite des grandes Écoles d'ingénieurs, créées pour les besoins du monde industriel et professionnel, devant la carence française de l'Université restée trop longtemps dans sa tour d'ivoire, peu attentive aux nouvelles techniques de la révolution industrielle

Dans la plupart des autres pays anglo-saxons, les universités autonomes, donc plus réactives, ont su s'adapter en permanence à l'évolution scientifique, économique et industrielle, évitant ainsi la création de grandes Écoles spécialisées.

8 - C'est l'éternelle question pour toutes les inventions. **Comment l'idée est-elle venue à l'inventeur ?** Il est possible que Gramme ait vu à l'exposition universelle de Paris en 1867 le moteur de Kravogl (IV-1) qui utilisait un anneau bobiné en plusieurs sections reliées à un collecteur, d'une façon très différente de celle qu'il a adoptée. Mais cela ne coïncide pas vraiment avec sa démarche inventive : conception du circuit fermé avec collecte directe du courant sur le fil dénudé, puis transfert de cette collecte sur un collecteur.

Documents **sur Gramme**:

Comptes-rendus de l'Académie des sciences, Paris, 1871/1874.

ANTOINE BRÉGUET, La machine de Gramme, sa structure et sa description, Paris, 1880.

JEAN PELSENEER, Zénobe Gramme, office de publicité, Bruxelles, 1941. L'auteur est secrétaire du Comité belge d'histoire des sciences.

Docteur LOUIS CHAUVOIS, Histoire de Zénobe Gramme, A. Blanchard, Paris, 1963.

Musée national des techniques, Zénobe Gramme, Paris, 1996.

Nombreux articles dans La Lumière électrique, La Nature, La Revue industrielle. —
cnum.cnam.fr

9 - SARTIAUX EUGÈNE et ALLIAMET MAURICE, Principales découvertes et publications concernant l'électricité de 1562 à 1900, Rueff, Paris, 1903, accessible sur URL : cnum.cnam.fr

Monographie du musée rétrospectif français de l'électricité à l'exposition universelle de 1900. On y trouve la description et photo de dizaines de machines Gramme qui avaient été exposés, mais ont disparu.

10 - L'institut National de Recherches Pédagogiques I.N.R.P. a eu le souci de préserver dans les lycées de nombreux matériels anciens, considérant que l'histoire technique est une aide pédagogique importante. C'est précisément l'un des objectifs de ce livre. Il a été recensé 26 machines Gramme du modèle présenté, avec gravure sur la plaque :

Gramme inv. breveté SGDG - Bréguet F t - n° 817. Si les n° correspondent uniquement à cette machine, ce est plus d'un millier qui auront été fabriquées en 15 ans, jusqu'en 1884, fin de la licence que Gramme avait accordée à Bréguet, sans doute gratuitement.

11 - Le système **des brevets** était assez flou suivant les pays ; le système français datant de 1844 consistait en un dépôt payant au Recueil du ministère du Commerce, sans examen préalable, à ses risques et périls, sans garantie de la nouveauté de l'invention, soit de la fidélité ou l'exactitude de la description. En un mot S.G.D.G., Sans Garantie Du Gouvernement. Le système dura jusqu'en 1968. Un brevet était donc valable 15 ans, tant que personne ne le contestait devant un tribunal. (zx)

Des conseils sur l'invention et le brevet en 1853 : C. DELORME, Propriété industrielle - Brevets, Génie industriel, vol .5, p. 171/174 et p. 242/247, 1853

12 - Description de la machine de Pacinotti :Descrizione di una macchinetta eletto-mecanica est accessible à l'URL:

<http://www.fondazionegalileogalilei.it/collezioni/pacinott/dati/pacin.pdf>

Da Il Nuovo Cimento, Série 1, Volume XIX, 1864, p. 378, fascicolo del giugno, 1864, pubblicato il 3 maggio 1865.

13 - FRANK GÉRALDY -La machine de Pacinotti et la machine Gramme, La lumière électrique, t.VII, n°34, p.369/371.

14- Cette hypothèse **du plagiat de Pacinotti par Gramme** fut pourtant affirmée par les revendications insistantes de Pacinotti en 1881 lors de l'exposition de Paris (III-4). Sur le plan pratique, un ouvrier belge ne pouvait connaître la publication en italien de Pacinotti, encore moins que les physiciens parisiens qui l'ignoraient. De plus, Il n'était pas à Paris, mais à Angers, quand Pacinotti est venu présenter sa machine en 1865 chez Dumoulin.

À l'inverse, l'éventualité de « **l'inspiration** » de **Pacinotti** fils par son père est très probable, de même que celle de ce dernier par plusieurs prédécesseurs. Il est assez étonnant qu'un jeune mathématicien, tout débutant en électricité, ait trouvé dès 1860 semble-t-il, à 19 ans, un principe redécouvert laborieusement en plusieurs années par Gramme, praticien expérimenté, après des dizaines d'autres. Par quel raisonnement, après combien de maquettes imparfaites ? Pacinotti ne donne aucune explication sur ce sujet ; ce fut peut-être une étonnante intuition, ou plutôt conseillé par son père qui en tant que professeur devait bien connaître plusieurs moteurs à anneaux déjà inventés à cette époque. Ainsi celui du Hollandais Elias (1842) constitué de deux anneaux bobinés, ou celui de son compatriote piémontais de Scarmagno, Bessolo, dont l'inducteur était aussi un anneau avec collecteur, de même celui de Kravogl, voisin de Merano au Sud Tyrol. Ces appareils sont décrits au chapitre sur les moteurs (IV-1).

15- Réversibilité: Il reste étonnant qu'une machine électrique réversible fonctionne en générateur comme en moteur alors que l'électromagnétisme mis en jeu est très différemment appliqué dans chaque cas. En moteur, chaque élément de spire de l'anneau tournant est parcouru par le courant d'un

générateur extérieur - il subit donc une force motrice d'Ampère résultant de l'action du champ magnétique d'un aimant ou électro fixe. Elle engendre une force contre-électromotrice.

En générateur, l'aimant ou électro fixe va "induire" un courant dans l'élément de spire de "l'induit" tournant qui se déplace dans son champ. C'est la force électromotrice d'induction de Faraday. Il en résulte une force de freinage empruntant l'énergie mécanique au système d'entraînement.

16 - G.PLANTÉ ET A.NIAUDET, Sur une expérience d'électrodynamique, Comptes rendus, t. LXXXVI, 1873, p. 1259 .

PLANTÉ, Recherches sur l'électricité, p.68/69, Paris, 1883, et Édition du centenaire.

17 - A l'exposition de Vienne en 1873 figuraient aussi, peu remarqués, deux petits moteurs à anneau et collecteur, proche de la dynamo Gramme. Celui de Pacinotti (1861) exposé pour la première fois et celui de l'Autrichien Kravogl qui figurait déjà à l'exposition de Paris en 1867. Celui de Bessolo (1853), qui a vraisemblablement inspiré celui de Pacinotti n'a jamais été présenté, semble-t-il, sinon en Italie.

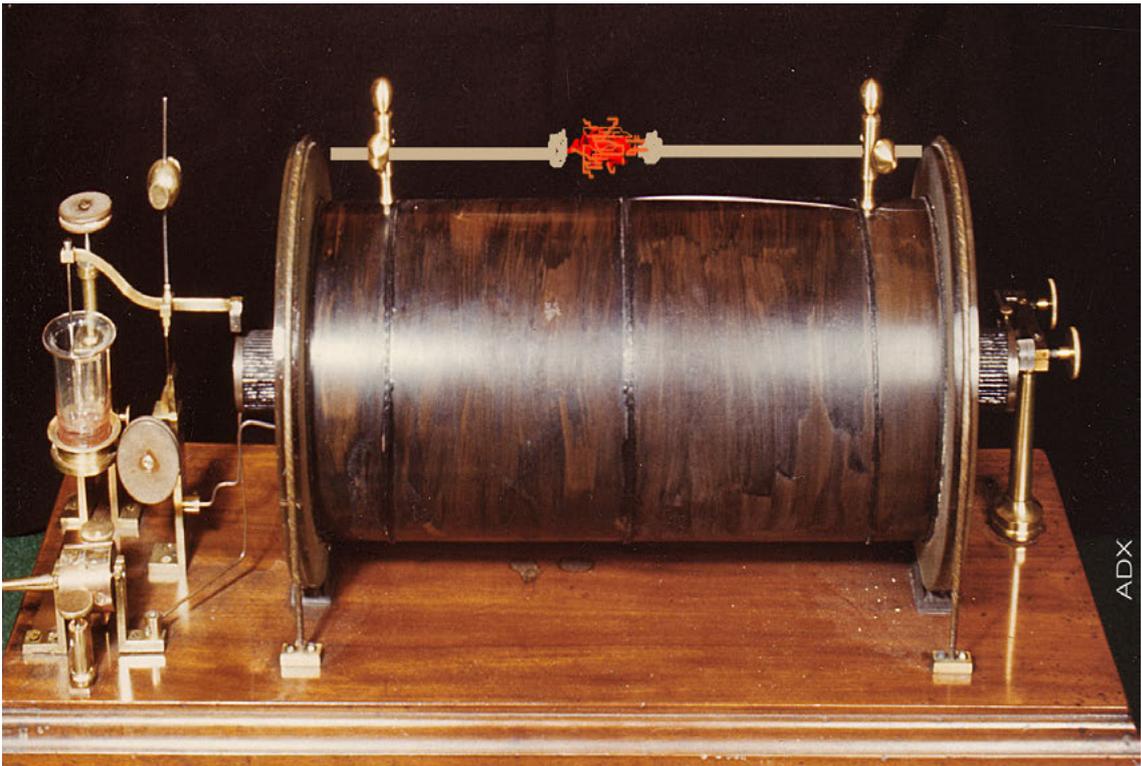
18 - **Félix**, homme discret, directeur d'une importante sucrerie à Sermaize, ne cherchait pas la reconnaissance de sa compétence, il rectifiait simplement un point, pour ne pas laisser trop transformer l'histoire technique en roman. Suite à un article sur l'histoire de Vienne en 1873, il envoya une lettre au Moniteur Industriel, publiée le 25/11/1886, dont l'extrait ci-dessus.

19 - Le nom de **Alteneck** a été utilisé simultanément avec celui de Siemens dans la description de cette dynamo à induit en tambour, étape finale. Hefner von Alteneck étant le concepteur de cette machine travaillant à la société Siemens & Halske, dont il devint ingénieur en chef. Werner Siemens, dirigeant fondateur, n'a jamais cherché à masquer le rôle essentiel de son principal collaborateur, comme cela se produisait trop souvent. (cf. Morse, Edison)

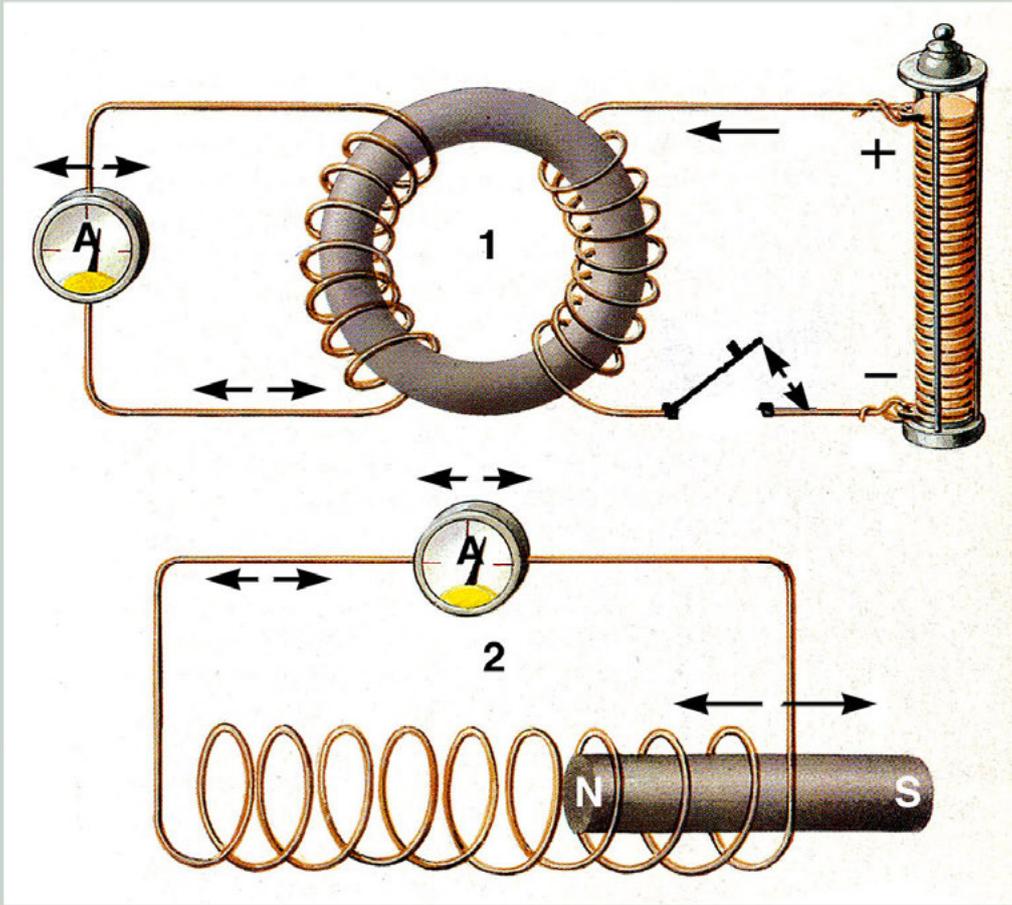
20 - Les relations entre nations, éternelle succession de rapprochements et divergences dépassent le domaine politique ou même militaire, pour s'étendre à l'économique, la technique et le scientifique.

Il est ainsi réconfortant de constater que l'aide industrielle de la France à la jeune Amérique à ses débuts, avec les fusils de Lafayette puis la technologie des machines Gramme, a été suivie de sa libération en 1944 par les avions et tanks produits par la puissante et efficace industrie américaine, puis aidée économiquement par le plan Marshall.





ADX



Deux processus d'induction

4 – Bobine d'induction ou de Ruhmkorff

Faraday avait découvert l'induction en 1831 avec les deux expériences ci-contre.

Dans la deuxième, un aimant inducteur ou une bobine parcourue par un courant constant, est introduite puis retirée rapidement de la bobine induite ; ce déplacement génère dans celle-ci un courant variable. Le phénomène fut aussitôt appliqué par Pixii au premier générateur, transformant de l'énergie mécanique en énergie électrique. (II-3)

Par contre, dans la première expérience, une bobine parcourue par un courant, en variation rapide suite à la fermeture ou l'ouverture de l'interrupteur, induisait un autre courant variable fugitif dans une bobine enroulée sur le même anneau ou tore magnétique. Ce montage sans aucun déplacement physique de bobine n'avait pas encore fait l'objet d'application pratique dans les années suivantes. Pourtant, des électriciens curieux avaient probablement expérimenté cette disposition de bobines, simplement pour comprendre mieux cet étrange phénomène d'induction.

Certains se sont alors aperçu que si le nombre de tours de la bobine induite est beaucoup plus grand que celui de l'inductrice, la tension induite devenait très élevée ; c'était le principe du transformateur de tension. Toutefois, pendant quatre décennies, les électriciens n'utilisèrent qu'un avatar du transformateur, la bobine d'induction, qui se révéla cependant très utile dans nombre d'applications, encore aujourd'hui.

La bobine d'induction de Masson

L'un d'eux, Antoine Masson professeur à Paris, recherchait un moyen pour obtenir à partir de la variation d'un courant inducteur, un courant plus durable que ce courant induit fugitif par nature. Son idée était d'envoyer, à cadence élevée, des impulsions de courant dans une bobine inductrice pour essayer de recueillir dans la bobine induite un courant si possible permanent ou pseudo continu. Les deux bobines, inductrice et induite, étaient proches de manière que le champ magnétique de la première traverse bien la seconde, ce que nous appelons aujourd'hui un bon couplage magnétique. L'optimum étant que les deux bobines soient coaxiales, enroulées l'une sur l'autre et l'effet était encore plus prononcé en plaçant un axe en fer dans l'axe des deux bobines coaxiales.

L'appareil imaginé par Masson en 1836, a été perfectionné vers 1841 par son ami Louis Bréguet, inventeur et fabricant de télégraphes (a). Les deux bobines sont enroulées sur le même axe en tiges de fer. L'inductrice comportant quelques centaines de tours est à l'intérieur, l'induite avec quelques milliers de tours de fils fins bien isolés est à l'extérieur.

La bobine inductrice est reliée à une pile par l'intermédiaire d'un interrupteur particulier, la roue de Pouillet (b), permettant par rotation manuelle de rapides connexion-déconnexion de la pile dans la bobine inductrice. Il est probable que le professeur Mathias Pouillet ait réalisé des expériences semblables avec sa roue.



a bobine d'induction de Masson et Bréguet

Ces rapides variations de courant induisaient dans la bobine induite une force électromotrice élevée, laquelle pouvait amorcer un arc, une forte étincelle permanente entre les deux sorties de la bobine. Le courant traversant cette étincelle était une succession rapide de courants oscillants à haute fréquence, mais les expérimentateurs ne pouvaient pas le savoir, n'ayant aucun moyen de détection.

Les résultats qu'obtint Masson ne devaient pas le satisfaire et le système fut un peu oublié. Pourtant on signale que Masson aurait obtenu bien avant Geissler des effets lumineux en connectant sa bobine génératrice de haute tension à des tubes à air raréfié.

La bobine de Ruhmkorff

Cet appareil bien connu résultait du perfectionnement de la bobine de Masson par d'autres électriciens. Heinrich Ruhmkorff, allemand venu s'établir à Paris pour construire des appareils scientifiques, se spécialisa dans cette fabrication.

Sur le schéma (c) l'interruption du courant est obtenue automatiquement à cadence élevée par une palette souple portant un marteau E en fer, attiré par l'axe en fer des bobines lorsque le courant passe ; le circuit de la pile est interrompu au niveau de la vis de réglage F et la palette revient en contact avec la vis. Cet interrupteur à marteau ou trembleur était dû à de La Rive ou à l'allemand Neef. Il est encore classique dans les sonneries d'entrée d'appartement

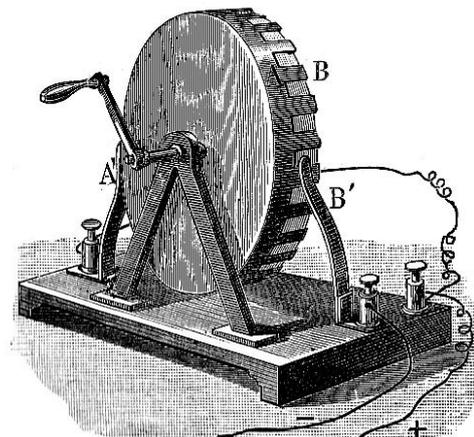
Sur l'appareil (d) la palette interrompant le circuit est attiré par un petit électro-aimant séparé. De plus, ce modèle permettait de faire varier la puissance de l'arc obtenu, en sortant progressivement le noyau de fer des bobines vers la droite, avec la vis de réglage à gauche.

Mais les étincelles de rupture sur la de la vis de contact détérioraient celle-ci rapidement si les bobines étaient puissantes. Un interrupteur plus perfectionné fut réalisé par Foucault. (e)

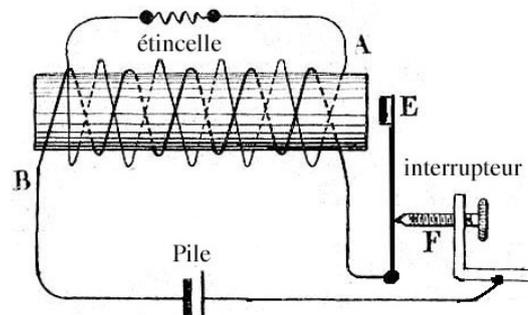
Il reprenait le système de contact employé sur la première machine de Pixii, entre l'extrémité d'une tige trempant dans le mercure contenu dans un godet. Le procédé fut amélioré en recouvrant le mercure avec de l'alcool.

D'autres systèmes furent élaborés pour cet interrupteur, ceux des Anglais Spottiswoode et Gordon. L'interrupteur rapide restait pourtant difficile à réaliser pour les bobines importantes.

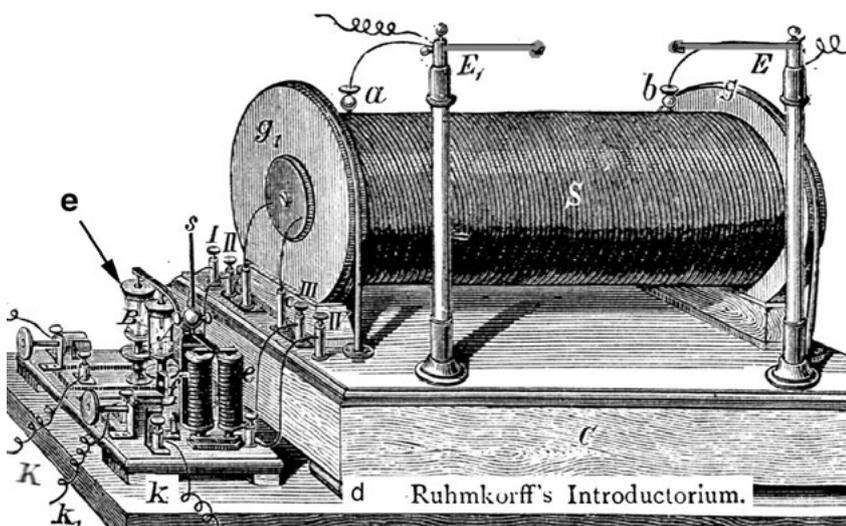
Nous savons que ces étincelles au contact étaient inévitables, à chaque rupture, l'énergie accumulée dans l'inductance de la bobine primaire devait se dissiper en chaleur. Cet extracourant de rupture avait été étudié par Faraday.



b Interrupteur tournant. (Roue de Pouillet.)



c Schéma de la bobine d'induction



d Ruhmkorff's Inductorium.

Les inventeurs de moteurs et générateurs se sont heurtés au même problème, l'usure rapide de leurs commutateurs et collecteurs à cause de cette inéluctable fatalité de la conservation de l'énergie inductive. (I-5). Le physicien français Fizeau eut alors l'idée de connecter un condensateur en parallèle avec l'interrupteur. Ce détail apparemment anodin a été capital, le procédé est toujours adopté de nos jours pour supprimer ces étincelles de ruptures dans nombre de montages électriques. Il est fort peu probable que Fizeau ait compris pourquoi cela marchait si bien, une intuition ou un hasard. (2)

Le condensateur était connu, ce fut d'abord la fameuse bouteille de Leyde, puis les deux plaques planes en vis-à-vis d'Aepinus et Volta. Mais la forme imaginée par Fizeau en 1853 est la forme actuelle, un empilement de feuilles métalliques minces alternées avec un isolant, papier ou tissu (f). Il était intégré dans le socle en bois de la bobine.

Construite à partir de 1851 dans l'atelier de Ruhmkorff, cette bobine prit son nom. Il n'avait d'ailleurs pas songé à la breveter, laissant d'autres la fabriquer aussi.

À partir du courant continu de quelques piles, elle générait une rapide succession de brefs courants à haute tension, des dizaines de milliers de volts. Ses longues étincelles relativement permanentes reproduisaient celles, très fugitives, des machines électrostatiques du siècle précédent. Une autre différence était le danger que des bobines puissantes pouvaient présenter pour les expérimentateurs, en raison de l'énergie véhiculée par ce courant s'il dépassait une dizaine de milliampères.

Les physiciens eurent alors à leur disposition un nouvel appareil permettant de nouvelles expérimentations insolites.

En 1864 Ruhmkorff reçut le grand prix Volta de 50 000 F, créé par Napoléon III pour récompenser l'invention de la machine électrique la plus puissante et utile.

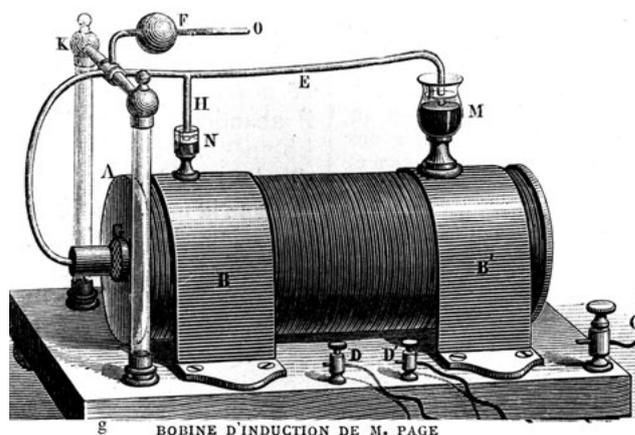
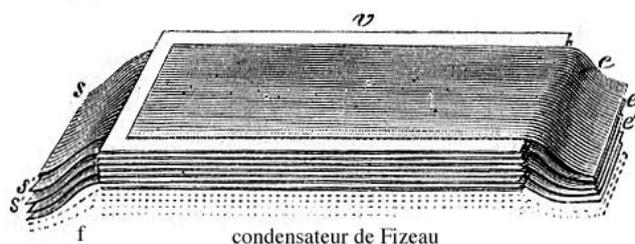
L'antériorité

Masson qui en était l'initiateur, comme peut-être d'autres inconnus, ne prit pas ombre de cette récompense ; ce ne fut pas le cas dans la jeune Amérique qui souffrait de ne pas être encore reconnue sur le plan scientifique.

Charles G. Page, électricien compétent, examinateur à l'US Patent office, déclencha une longue controverse sur cette invention qu'il revendiquait. Il avait en effet réalisé divers appareils exploitant l'induction, en particulier en 1838 un *Compound magnet and électrotome* très semblable à l'une des versions de la bobine de Ruhmkorff. On reconnaît en (g) l'appareil avec un interrupteur à deux godets de mercure. Il donnait d'appréciables étincelles de 8 pouces. Bien que l'on découvrit que l'Écossais Richtie, l'Anglais Sturgeon, l'Irlandais Callan avaient eux aussi réalisé des bobines semblables, un brevet fut accordé à posteriori à Page, pour l'honneur de la science américaine (3).

Comme l'a écrit Salem Howe Wales du *Scientific American*, « Cet épisode était encore un autre oubli des réalisations américaines par les savants européens, ce qui n'était que trop souvent le cas. Le véritable inventeur de l'induction n'a pas été ignoré, il était inconnu. »

Le cas de Page était en effet proche de celui d'Henry qui aurait découvert l'induction avant Faraday, sans le publier. Le panthéon des grands électriciens américains s'étoffait avec Franklin,



Henry, puis Page, en attendant Morse et le trop célèbre Edison.

En France, la bobine de Page ne fut connue qu'en 1878 par une publication de Théodore du Moncel. En résumé, cette bobine d'induction était une jolie fille, pleine d'avenir, dont tout le monde voulait être le père, oubliant un peu trop son grand père Faraday.

Quel est l'inventeur de la bobine d'induction ? Faraday, Masson, Ruhmkorff, Spottiswoode, Page ou d'autres inconnus ? Le lecteur fera son choix. C'est sans importance, elle existe.

Les applications

Elle eut en effet un riche avenir.

1 - D'abord ce fut un concours à la plus grosse bobine. Le Philosophical Magazine présentait en janvier 1877 le record de l'Anglais Apps : Une bobine de longueur 1,2 m, diamètre 0,5 m, poids 762 kg, primaire 546 m de fil enroulé sur 13 000 tours, secondaire 450 km sur 341 000 tours. Elle fut présentée au public à la grande expo de 1881, alimentée avec 30 éléments Grove, soit 50 volts, l'étincelle, ou plutôt l'arc qu'elle amorçait atteignait 42 pouces, soit plus d'un mètre. La tension de claquage dans l'air devait dépasser le million de volts.

2 - La haute tension à haute fréquence engendrée par la bobine d'induction permit l'étude des décharges dans les gaz raréfiés renfermés dans les *oeufs électriques* (h), à l'origine de l'éclairage par décharge (III-1).

3 - Hertz découvrit en 1888 les ondes électromagnétiques, rayonnées par l'étincelle d'une bobine d'induction.(V-3)

4 - Ce sont des bobines d'induction qui étaient la source de courants à haute fréquence des premiers émetteurs de TSF.

5 - Les rayons X seront découverts de même en 1895 par Röntgen (V-4).

6 - Et comme la plupart des découvertes et inventions qui ont contribué à l'amélioration de la condition humaine, cette bobine permettait aussi de tuer, en déclenchant à distance l'explosion des mines de guerre en Russie.

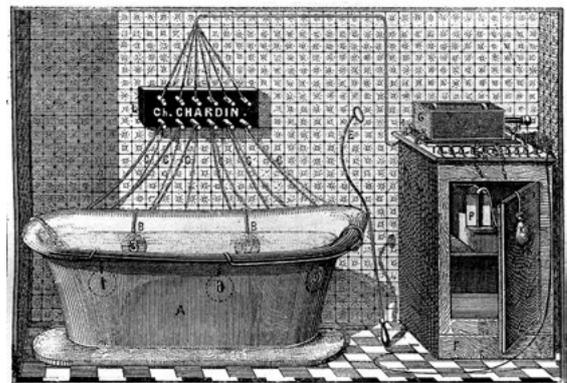
7 - Des vertus thérapeutiques furent attribuées au courant à haute fréquence, sous tension pas trop élevée, obtenu avec des petites bobines.

De nombreux modèles furent fabriqués pour cet usage dans tous les pays. En France, Chardin se spécialisa dans la fabrication de ces appareils électromédicaux qui connurent un fort engouement. Dans une installation fixe le courant était transmis par des électrodes immergées dans le bain où était plongé le patient (j).

Les coffrets portatifs (k) comprenaient une pile étanche (à gauche), la bobine d'induction (à droite) dont on pouvait régler la fréquence par le trembleur et la tension en insérant un axe de fer au milieu des bobines.



h Oeuf électrique



j bain électrique de Chardin



k bobine de Ruhmkorff portative

Le tiroir inférieur contenait les électrodes à appliquer humides sur les parties du corps à traiter.

8 - Le Wallon Etienne Lenoir avait développé en 1860 un premier moteur à explosion alimenté par le gaz d'éclairage, disponible seulement dans les villes disposant d'une usine à gaz. À partir de 1880, les dynamos se multipliaient, il fallait trouver d'autres moteurs plus pratiques que les machines à vapeur. En 1883, Lenoir perfectionna son moteur et pour allumer l'explosion au moment voulu, une bobine d'induction envoyait une impulsion à haute tension sur un éclateur disposé en haut du cylindre, ceci par un contact synchronisé avec le déplacement du piston.

Les moteurs à essence de pétrole qui apparurent peu après ont utilisé ce même dispositif d'allumage et l'ont conservé jusqu'aujourd'hui.

Des milliards de véhicules à essence (4) utilisent encore ce procédé d'allumage depuis plus d'un siècle (l) et (m). L'étincelle d'allumage à haute tension y est produite par une bobine d'induction (Masson, Ruhmkorff, Page et autres) alimentée au primaire par la batterie d'accus (Planté); un rupteur (Foucault) établit fugitivement et coupe ce courant dans la bobine dont le secondaire génère ainsi une haute tension d'une dizaine de milliers de volts. Le distributeur rotatif (Delco) transmet cette tension successivement à chaque bougie de Lenoir ou éclate l'étincelle allumant le mélange explosif essence air.



1 Bobine d'allumage 1995



Un indispensable condensateur (Fizeau) est branché aux bornes du rupteur - les automobilistes savent que sa défaillance est l'une des causes traditionnelles des pannes d'allumage. L'automobile, principal fleuron de notre moderne civilisation industrielle, fonctionne grâce à cette bobine inventée par quelques hommes, il y a plus d'un siècle. Depuis quelques années seulement, elle est remplacée par un générateur de haute tension électronique.

9 - La bobine d'induction était le précurseur d'un appareil capital dans les futurs réseaux à courants alternatifs, le transformateur. Lorsque plusieurs expérimentateurs remplacèrent le courant continu haché par le trembleur d'une bobine, par du courant alternatif, l'un d'eux, Gaulard, réalisa que cet appareil pouvait résoudre le grand problème de la décennie 1880, le transport de l'électricité à distance (IV-2).

Compléments

Cette bobine d'induction a été classée par analogie avec les appareils générateurs d'électricité, alors qu'elle ne fait qu'en transformer la nature. Elle transforme du courant continu à basse tension en courant pulsé à haute tension et fréquence élevée.

1- Faraday pourrait ainsi être considéré comme l'inventeur du principe du transformateur, en tant qu'objet technique, mais pas en tant qu'utilisation pour élever ou abaisser la tension des circuits à courants alternatifs. Application capitale révélée 50 ans plus tard par Lucien Gaulard qui d'ailleurs l'appelait générateur secondaire. Il arrive parfois, en histoire des sciences et techniques, qu'un personnage réalise un appareil dont il ne perçoit pas bien à quoi il peut servir. Des années plus tard, cet appareil permet de résoudre un problème important.

Un autre exemple connu, plus proche de nous, a été la découverte du laser après 1953 par deux équipes russe et américaine. Découverte elle-même consécutive à celle d'un phénomène complexe, le pompage optique, par le professeur français Kastler en 1950. Pendant des années, on ne trouvait à cet

instrument surprenant que quelques applications techniques ou médicales de faible diffusion, une solution sans problème disait-on. Et puis des inventeurs des sociétés Philips et Sony vont utiliser ce laser pour stocker des quantités inimaginables de données numériques sur ce compact disc CD, suivi du DVD, que des centaines de millions d'appareils à laser traduisent chaque jour en musique ou en images depuis 1982.

Science et technique ne sont pas les modèles de logique comme le pense souvent le public. S'il y a toujours nombre de problèmes sans solution, apparaît parfois une solution sans problème...pour un temps.

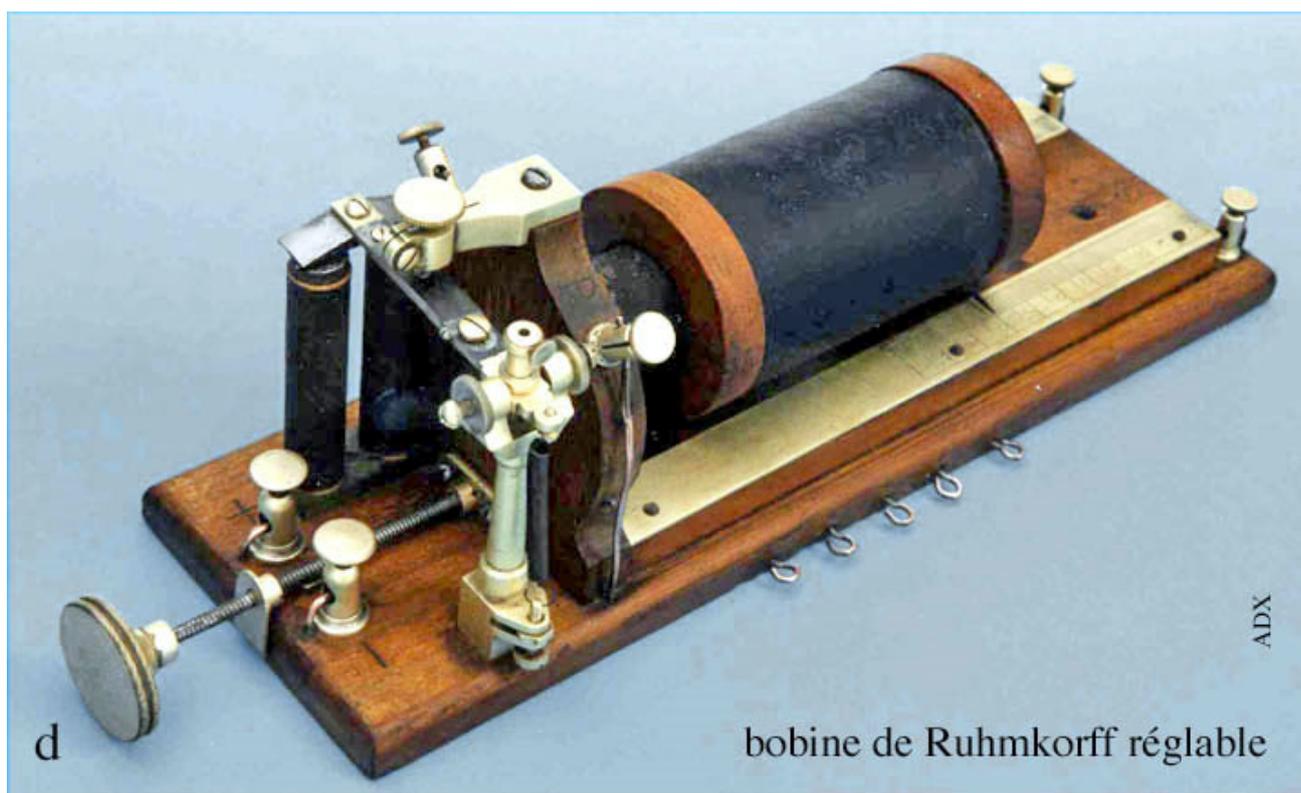
2 - Conservation de l'énergie : Tout élève électricien apprend aujourd'hui qu'un condensateur évite l'étincelle à la coupure d'un courant continu dans une bobine ayant absorbé l'énergie inductive ($\frac{1}{2} L I^2$), en la transférant dans un condensateur ($\frac{1}{2} C U^2$) sous forme d'énergie capacitive. Elle ne sera plus dissipée en chaleur dans l'arc de rupture. Cette énergie peut, suivant les montages, être dissipée dans une résistance, ou réinjectée dans la bobine lors de la refermeture fugitive du contact.

Dans nos réseaux en courant alternatif, ce phénomène permanent de transfert d'énergie entre capacités et inductances est qualifié d'énergie réactive. Il a d'importantes conséquences.

3 - Un document récent sur la priorité Page a été publié par l'historien Robert C. Post de la Smithsonian Institution de Washington : *Stray Sparks from induction Coil : Volta Prize and the Page Patent* - Proceedings of IEEE, vol.64, No 9, sept. 1976, p.1279/1286.

4 - Les moteurs à explosion inventés par l'Allemand Rudolf Diesel en 1893, diffusés en 1898, n'ont pas d'allumage électrique, celui-ci se produisant spontanément par la forte compression du mélange air-pétrole.

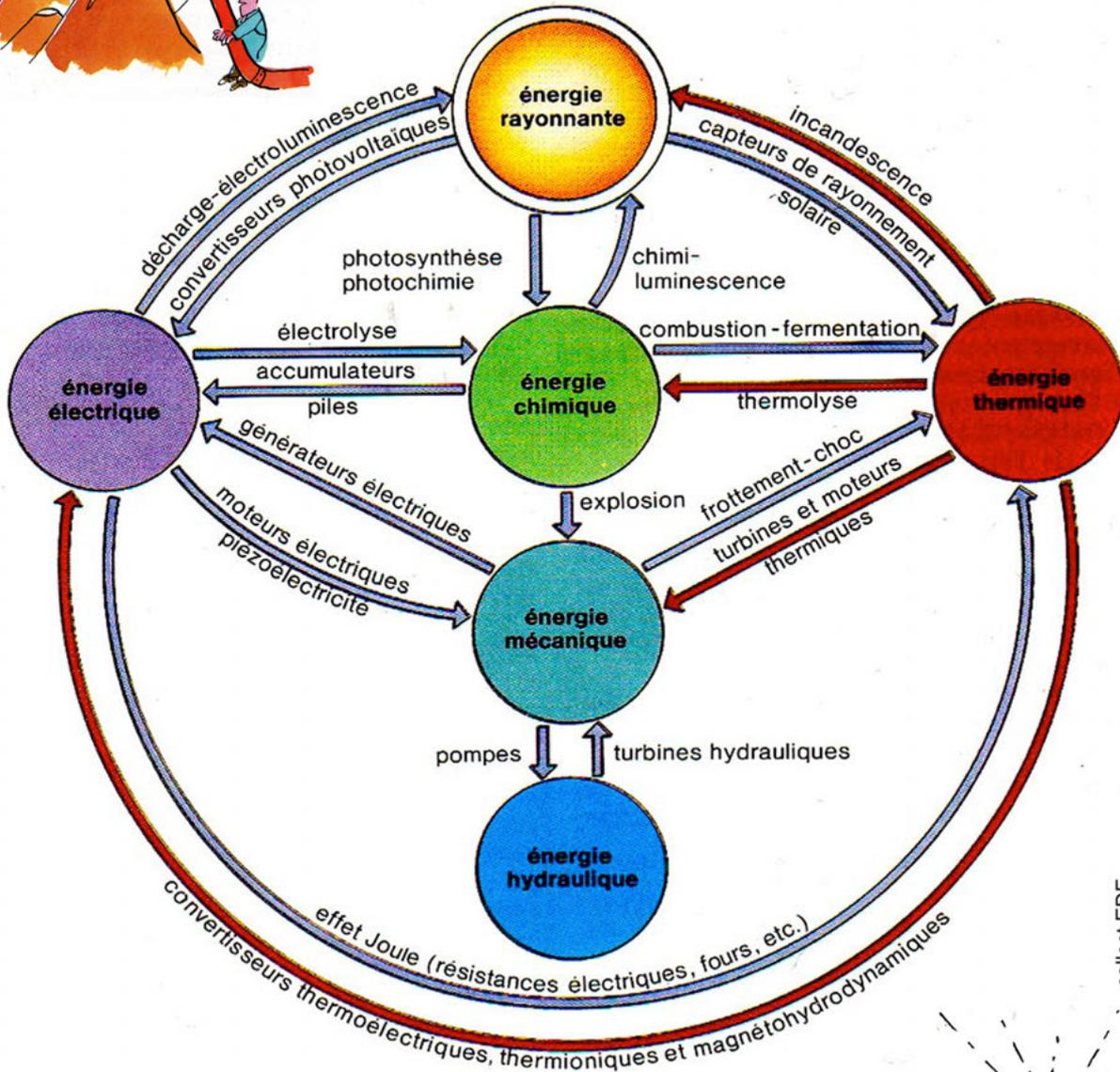
5 - Masson a édité un traité sur le domaine qu'il connaissait bien : Théorie physique et magnétique des phénomènes électrodynamiques - Paris, 1838, accessible sur URL : gallica.bnf.fr





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

L'HISTOIRE DE L'ENERGIE, 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



5 – Quelles énergies pour produire l'électricité ?

Le problème des ressources en énergie pour produire l'électricité étant crucial pour le XXI^e siècle, ce chapitre est beaucoup plus développé que les précédents sur la situation au début de ce siècle.

En effet, l'énergie électrique était le problème d'électriciens, mécaniciens et thermiciens, travaillant sur le sujet depuis 130 ans. Mais depuis les années 1980/90, devant la raréfaction à moyen terme, prélude à l'épuisement des principales énergies fossiles, tout le monde pense découvrir des énergies nouvelles. On oublie souvent que la principale contrainte de l'électricité est d'être disponible 100 % du temps, ainsi que la grande loi de la conservation de l'énergie :

L'énergie n'est ni créée ni détruite, elle se transforme.

L'électricité, n'existant pratiquement pas à l'état naturel, n'est qu'un vecteur de l'énergie issue de différentes sources naturelles, ou leurs conversions successives. L'énergie, concept que les physiciens ne peuvent d'ailleurs définir, se manifeste, se transforme et se stocke sous de multiples formes : chimique, thermique, nucléaire, mécanique, gravitationnelle, électrique etc. Depuis 130 ans physiciens et électriciens ont cherché quelles formes d'énergies, converties en une autre, puis encore en une autre, pouvait produire :

– Soit l'électricité directement, l'idéal.

– Soit indirectement l'énergie mécanique de rotation capable de faire tourner les dynamos puis les alternateurs, produisant actuellement 98 % de notre l'électricité. Ceci, avec la meilleure optimisation globale sur les plans, techniques, coûts, durabilité, sécurité, disponibilité sur terre, transport, écologie, déchets. La continuité de service, c'est à dire la disponibilité à chaque seconde est probablement la qualité la plus impérative et difficile à garantir.

L'optimisation entre toutes ces contraintes est inévitablement différente pour chaque pays et à chaque époque.

L'électricité dans les besoins énergétiques de l'homme

Elle n'en assure qu'une partie, essentiellement en énergie mécanique ou pour divers process industriels. Avant l'ère industrielle, approximativement 1830, l'animal, surtout le cheval, était la principale source d'énergie mécanique. S'y ajoutait la chaleur du soleil convertie en vent pour les bateaux et moulins, ou évaporant l'eau, retombant sur les montagnes et retournant à la mer par la force de gravitation, en faisant tourner des roues hydrauliques. En plus de sa propre force, chaque homme disposait en moyenne de la force d'un cheval.

Il y avait moins d'un demi-milliard d'hommes.

Aujourd'hui 6,8 milliards d'humains disposeraient chacun, en moyenne, d'une énergie de 1,12 tep par an, soit de 40 kWh par jour, soit du travail de 100 chevaux à crottin. Mais 1/3 des habitants dans les pays industrialisés disposent de 200 à 300 chevaux, alors que les autres 2/3 se contentent de 50 ou moins, et 1/5 n'a même pas d'électricité – simples ordres de grandeur.

Ils utilisent cette énergie pour leurs besoins personnels et professionnels, la plus grosse écurie en pays industrialisé étant probablement celle des transports avec environ 70 chevaux par personne. Nos arrière grands-pères se contentaient d'un ou deux chevaux pour tirer leur charrette et labourer leur champ.

La révolution industrielle du XIX^e siècle résultait du fort potentiel énergétique de ce nouveau moteur à vapeur convertissant en énergie mécanique celle de la vapeur, obtenue par la chaleur, à partir de l'énergie chimique du charbon, brûlant avec l'oxygène de l'air, soit trois conversions successives

Le charbon n'étant énergétiquement qu'un stockage temporaire d'énergie solaire depuis quelques millions d'années, comme le pétrole et le gaz. Pourtant la chaleur produite par ces combustibles dits fossiles est un bien médiocre moyen pour la convertir en énergie mécanique, avec une perte de 60 à 90 %, résultant du rendement de Carnot.

Énergie primaire et énergie finale

Le terme de source primaire est normalement attribué à l'énergie 1, dans une conversion d'une énergie d'une nature 1 en une autre de nature 2. Mais la plupart des énergies utilisées en final sont le résultat de plus d'une conversion, mais 2,3, 4 conversions successives ou plus. Ce qui complique la comparaison chiffrée entre elles dans les statistiques, car pour chacune le rendement de conversion est différent.

Il fallait une unité commune à toutes les énergies primaires, définies par l'état où la nature nous les fournit. On adopta d'abord la tec, tonne équivalent charbon, maintenant c'est la tep, tonne équivalent pétrole, avec comme équivalence avec le watt.h :

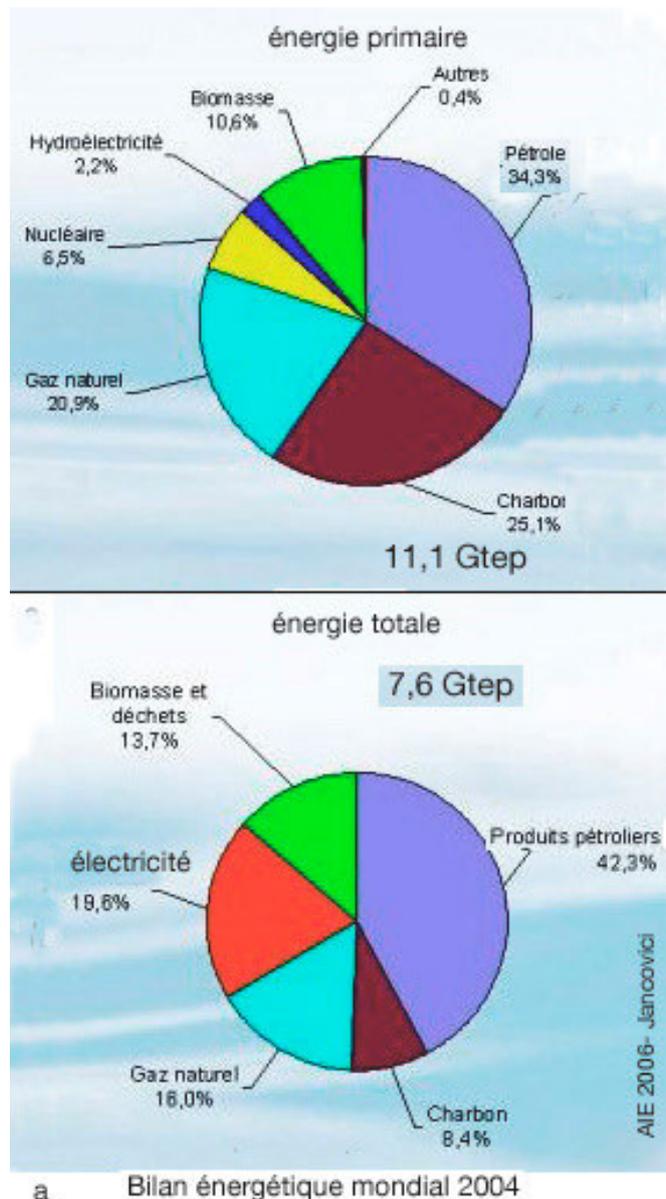
$$1000 \text{ kWh} = 0,086 \text{ tep}$$

Pour les productions électriques, on considère qu'avec les énergies naturelles, hydraulique, marée, vent, solaire transformées en électricité c'étaient les kWh produits qui étaient des énergies primaires, car il est difficile de chiffrer l'énergie de la chute d'eau ou du vent. Par contre, pour l'électricité des centrales thermiques, à combustibles fossiles ou nucléaire, l'énergie considérée comme primaire est la chaleur générée par la combustion du charbon, du pétrole, ou de la fission nucléaire ; l'énergie électrique finale est ainsi beaucoup plus faible compte tenu du rendement, par exemple 0,33 à 0,45.

Ces précisions permettent d'interpréter la comparaison dans le graphique (a) montrant la conversion des 11,1 Gtep (milliards de tep) d'énergie dite primaire utilisée en 2004 dans le monde et convertis en 7,6 Gtep d'énergie finale, dont l'électricité. Mais les énergies dites finales ne le sont pas toutes réellement car pour les utiliser on doit les convertir encore, soit en chaleur de chauffage avec un rendement 1 pour le radiateur électrique,

assez bon, 0,85 à 0,95 pour la chaudière pétrole ou gaz, soit en énergie mécanique, un moteur, et là l'électricité a un bon rendement de 0,9, mais celui du pétrole tombe à 0,15 moyen dans un moteur d'automobile.

En énergie finale, prête à l'emploi, l'électricité représente le cinquième, 19,6%, du total de la consommation mondiale, environ 40 à 50% dans les pays développés. En France 44,5%, le pétrole 31%, le gaz 14,6%.



Aussi, toutes les statistiques comparant les productions et consommations d'énergies primaires ou finales à échelle nationale ou mondiale doivent être interprétées avec précaution, car elles ne comparent pas des entités comparables sur le plan de l'utilisation, en raison du rendement variable de conversion d'une énergie en une autre directement utilisable.

Les sources primaires

La première source d'énergie, réellement primaire, d'où sont issues toutes les autres, est la matière, processus découvert seulement au début du XXe siècle, avec la célèbre formule d'Einstein :

$$e = m \cdot c^2$$

Toute matière de masse m (kg) peut se transformer en une énergie e (joule), avec un coefficient d'équivalence c^2 , le carré de la vitesse de la lumière c (300 000 km/s).

Un exemple simple permet d'en apprécier les conséquences : la consommation électrique annuelle du TGV en France résulte de la conversion en énergie de 21 kg de matière, des noyaux atomiques. Inutile de souligner que c'est théoriquement une réserve infinie, puisque constituant tout l'univers. Le grand problème est qu'il faut trouver les convertisseurs capables de la transformer en énergie utilisable - et laquelle, thermique, électrique, mécanique, chimique, lumineuse ou autre ?

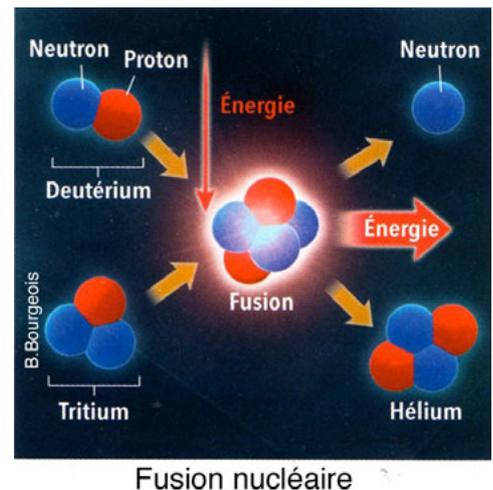
Cette découverte théorique capitale fut ensuite appliquée directement par l'homme dans deux conversions, la fission des noyaux de métaux lourds en 1938/1942, puis 10 ans après, bien plus puissante, la fusion de deux noyaux de deutérium, isotope de l'hydrogène, l'élément le plus léger. Dans les deux cas, la méthode initiale a été la plus facile mais brutale, non contrôlée, l'explosion ; ensuite pour les métaux lourds, on arriva à convertir l'énergie en chaleur d'une façon continue et contrôlée d'abord dans des piles expérimentales, puis dans les réacteurs de centrales électriques. Le second processus, la fusion serait bien plus intéressante, mais on est encore très loin de le contrôler, encore plus de l'utiliser un jour.

L'homme ne peut pourtant pas considérer qu'il a inventé ces processus, mais seulement découvert, puisque qu'ils sont naturels. La Nature a laissé des traces d'une dizaine de réacteurs de fission spontanée d'uranium au Gabon aux environs d'Oklo, actifs il y a quelque 2 milliards d'années. Et l'on a enfin compris que c'était la fusion nucléaire qui fait briller toutes les étoiles depuis 13,4 milliards d'années, dont notre soleil.

Les savants sont modestes, ils n'ont rien inventé sur ce plan et sont déjà très satisfaits d'arriver à imiter très partiellement la Nature.

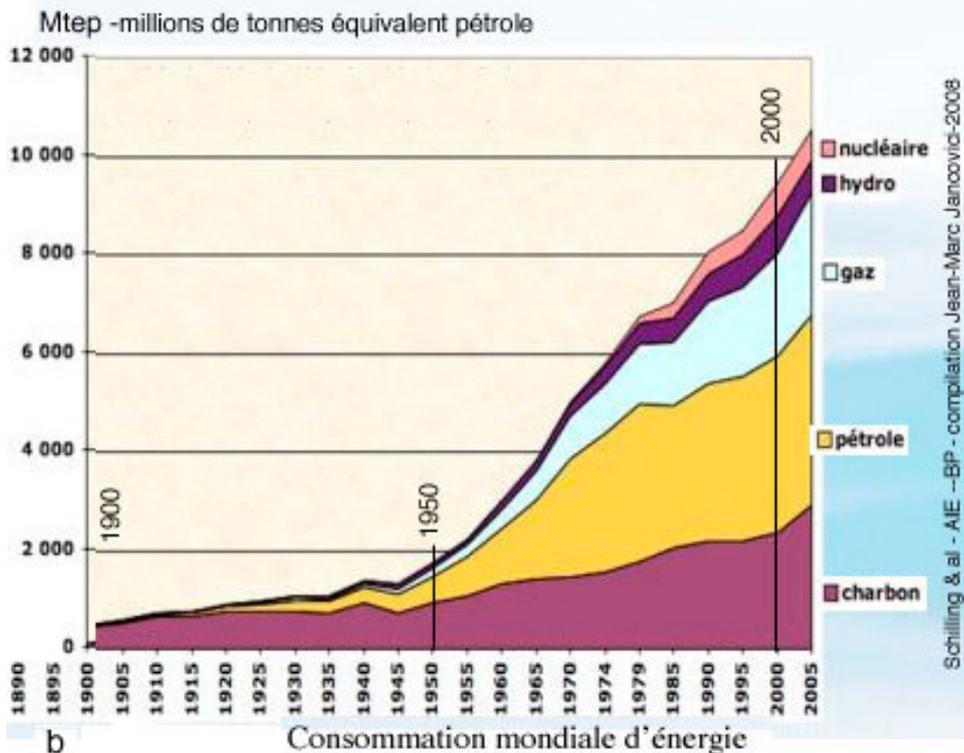
Le soleil est généralement considéré comme une source dite primaire, mais pas réellement, puisque déjà issue de la matière. Il envoie sur terre par rayonnement, moins d'un milliardième de l'énergie de fusion nucléaire de son hydrogène transformé en hélium. L'homme a essayé de le copier, d'abord par une explosion thermonucléaire, mais saura peut-être s'il peut la contrôler en la convertissant en chaleur, c'est le projet international ITER, démarré en 2008 dont la faisabilité sera confirmée ou infirmée vers 2030.

La probabilité de réussite est très faible, mais l'enjeu formidable, l'hydrogène contenu dans 10 litres d'eau fournirait chaque seconde, théoriquement, toute la puissance électrique nécessaire à l'Europe, sans aucun déchet. Ne rêvons pas, car nous savons que tous ces chiffres mirifiques impliquent que l'on trouve un convertisseur d'énergie adéquat, encore inconnu, très probablement impossible.



Le rayonnement solaire, dont la part la plus néfaste à la vie est filtrée par l'atmosphère, envoie sur terre théoriquement plus d'un kW par m². La quasi-totalité est réémise directement vers l'univers, sinon la terre s'échaufferait ; du restant, une partie est accumulée temporairement par photosynthèse dans les végétaux et organismes pour élaborer le bois et le plancton, peut-être transformé dans quelques millions d'années en charbon, pétrole et gaz. Une autre partie infime est empruntée temporairement par l'homme sous forme d'énergies naturelles obtenues par conversion de l'énergie solaire et restituée finalement sous forme de chaleur.

Une autre source, non plus réellement primaire, est la chaleur interne du manteau terrestre, elle aussi comme le soleil, est issue de la matière par la fusion nucléaire dans les étoiles, dont la terre n'est qu'un morceau. Cette chaleur est entretenue à 90% par la désintégration de l'uranium et du thorium contenus dans la croûte superficielle qui en contient en moyenne 3 g par tonne, surtout dans les sols granitiques et sédimentaires. L'homme peut emprunter une petite partie de la chaleur résiduelle dans le sous-sol, la géothermie, exploitation qui ne peut être qu'un apport très marginal pour produire de l'électricité, sa température étant trop faible, sauf dans quelques rares régions volcaniques.



Toutes les autres énergies ne sont que des sources secondaires, tertiaires ou plus, obtenues par conversions successives de l'énergie primaire de la matière via le soleil, telles les énergies fossiles, stockage limité et ancien d'énergie solaire, ou les forces naturelles d'il y a un siècle, dénommées aujourd'hui énergies renouvelables, produites par le soleil.

Pour simplifier, il est d'usage de désigner aussi par énergie primaire ces énergies converties, charbon, pétrole, gaz, hydraulique, nucléaire dont on constate la forte progression depuis 1950 en (b). Les énergies renouvelables, sauf hydraulique, n'apparaissent pas, n'atteignant encore que 1,1% en 2005. L'électricité, obtenue par une ultime conversion d'une partie des précédentes, représente un cinquième de l'énergie finale utilisée.

Mais la conversion d'une partie des énergies fossiles ou nucléaires en électricité passe inéluctablement par la chaleur et son difficile problème de réversibilité, sa re-transformation en énergie mécanique seulement partielle.

La chaleur, énergie finale, fatale

L'énergie thermique ou calorifique est l'étape intermédiaire pour produire la plus grande partie de notre électricité, c'est une forme banale, mais très particulière.

Il a été expliqué (I-6) comment des hommes ont découvert la loi de conservation de l'énergie vers 1840 et ses implications : toutes les énergies primaires ou intermédiaires se transforment en chaleur,

directement ou par stades successifs. Mais l'incontournable handicap de l'énergie thermique est qu'elle est la plus dégradée, fatale, « en bout de chaîne », se reconvertissant difficilement et partiellement en d'autres énergies, en particulier mécanique, la plus importante pour nous.

Nous avons vu que la conversion directe, chaleur > électricité, la thermoélectricité, ambition des anciens électriciens, avait été abandonnée pour son rendement inférieur à 1% (II-2). Il faut alors se contenter pour générer 83% de notre électricité, des conversions successives, chaleur > énergie mécanique > énergie électrique, dont on sait depuis Carnot pourquoi le rendement de la première est si médiocre. Rappelons que ce rendement global pour les premiers moteurs à vapeur était de 6 à 8%, 12 % pour les dernières locomotives à vapeur des années 1950. Les centrales thermiques classiques ont un rendement global de 40 à 45% suivant les techniques, au plus 55% avec les turbines à gaz en cogénération ; les centrales nucléaires actuelles ne dépassent pas 33% ou 35% pour la génération III, un peu plus pour l'éventuelle génération IV, si la température des matériaux peut y être plus élevée. (2)

Les premières centrales des années 1880 utilisaient le charbon pour chauffer la vapeur nécessaire aux anciennes machines à pistons de Watt. Elles consommaient 1 kg de charbon pour produire 1 ch.h. Aujourd'hui il faut 0,4 kg de charbon pour produire 1 kWh dans une centrale à 40 % de rendement, soit une réduction de 70%. Leur énergie mécanique était ensuite convertie en énergie électrique par les dynamos au début, puis par les alternateurs, avec un bon rendement de 90% ou plus.

L'amélioration majeure fut l'invention de la turbine à vapeur par l'Anglais Charles Parsons en 1884, puis le Suédois C.Laval, suivie de sa première théorie par le Français Rateau dans les années 1890 (c). Ce nouveau moteur à vapeur imposait de grandes vitesses de rotation aux alternateurs ; le rendement et la puissance s'amélioraient progressivement par la possibilité d'associer 2 ou 3 étages de pression pour atteindre actuellement 165 bars à une température de 550° C.

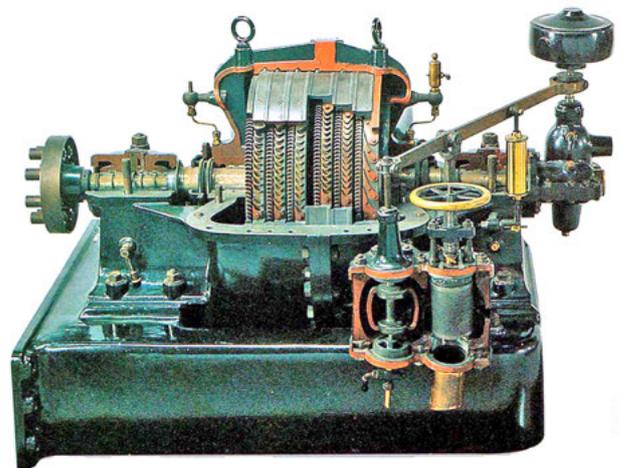
À ces niveaux, le rendement énergie thermique > énergie mécanique n'atteint encore que 40 %, le reste étant dissipé et rendu à la nature, au condenseur de vapeur.

Ce condenseur, dit source froide suivant Carnot, doit alors être aussi froid que possible, par évacuation de ses calories dans les eaux d'un fleuve, soit dans la mer, la meilleure solution, soit à défaut dans l'atmosphère par ces hautes tours de réfrigération à la taille cintrée, les aéroréfrigérants, couronnés d'un peu de vapeur d'eau blanche (d).

Les médias en ont fait à tort le symbole d'une centrale nucléaire, alors qu'ils n'ont aucun lien avec le procédé de chauffage, à flamme ou nucléaire. Ces deux types de centrales thermiques peuvent avoir besoin, ou non comme en bord de mer, de ce type de refroidissement de la vapeur.

Centrales thermiques à flamme

Elles transforment la chaleur de l'énergie chimique obtenue par la combustion de produits carbonés avec l'oxygène de l'air, en énergie mécanique, puis électrique.



Turbine à vapeur Rateau - 1889



d Aéroréfrigérants de centrale thermique

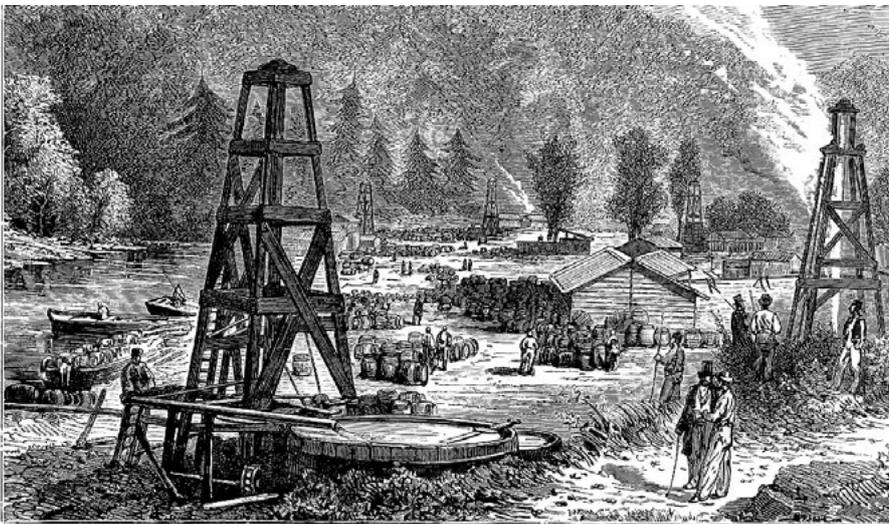
Le combustible fossile était au début, le charbon ou le lignite, puis le pétrole, le gaz. S'y ajoutent aujourd'hui la biomasse et les ordures. Leur inconvénient principal est que les combustibles fossiles, non renouvelables, à épuisement plus ou moins proche, produisent du gaz carbonique CO₂.

Le charbon, exploité depuis trois siècles est toujours la première source d'énergie convertie en électricité. Des progrès ont permis d'en exploiter le maximum de chaleur de combustion tout en réduisant sa pollution : pluies acides, soufre, fumées, CO₂, cendres.

Son utilisation s'accroît dans les grands pays charbonniers, son coût étant plus réduit que celui du nucléaire, si ce dernier fonctionne moins de 5000 h/an. Le problème majeur est le dégagement de CO₂ résultant de sa combustion, celui-ci étant considéré comme l'un des principaux responsables du réchauffement climatique. Des expérimentations sont en cours pour « séquestrer » le CO₂, le stocker à la sortie de la centrale, puis le transporter pour l'enterrer dans des sites géologiques appropriés, en espérant que le sol ne fuira pas avant X millénaires, en rediffusant ces milliards de tonnes dans l'atmosphère.

Chiffres : Le charbon assure **39%** de la production mondiale d'électricité. Les réserves mondiales sont aux USA pour 29%, en Russie pour 19%, en Chine pour 14%, en Australie pour 10%. Elles peuvent assurer la consommation actuelle pendant 130 ans. Le charbon qui reste dans le sol français est difficile à extraire techniquement, donc coûteux. L'extraction tue chaque année dans le monde de 10 000 à 30 000 mineurs.

Le pétrole, suintant jadis du sol au Moyen-Orient, a été un bon moyen de cuisson des briques d'argile, il y a quatre millénaires. On commença à l'exploiter en Pennsylvanie, puis à Bakou dans les années 1860, comme moyen d'éclairage plus efficace, mais plus cher que l'huile végétale ou animale (e). L'électricité a bien mieux résolu le problème (III-5).



e Puits de pétrole en Pennsylvanie - stockage des barils de transport

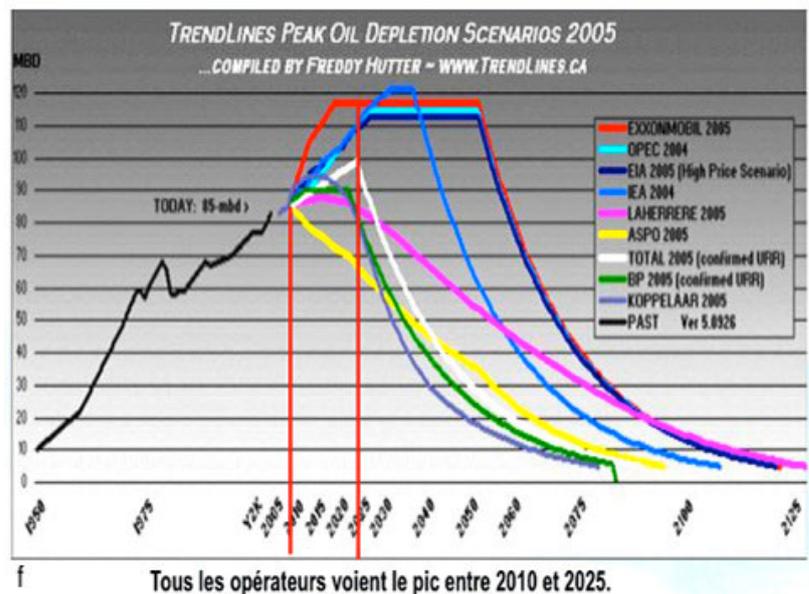
La plus grande facilité de transport du pétrole liquide dans des pipes line que celle du charbon solide, et son prix ont incité à l'utiliser depuis les années 1930 en Amérique et après 1950 en Europe pour le chauffage des locaux, puis pour la production de vapeur dans les centrales électriques. Mais on connaît sa principale qualité, se convertir en énergie mécanique par des moteurs thermiques afin de propulser la grande majorité des moyens de locomotion. (3)

Le pétrole a souvent remplacé le charbon pour les centrales électriques thermiques, surtout dans les pays producteurs, généralement le fioul lourd, plus coûteux à distiller que les variétés plus légères ; solution que la France, dont le charbon devenait trop cher, avait aussi commencé à adopter avant 1973, de même l'Italie.

Pour des réseaux de puissance relativement faible, par exemple ceux des Îles, les alternateurs sont entraînés par de gros moteurs diesels au fioul, type marine.

Chiffres : Actuellement, 7% de l'électricité mondiale est générée dans des centrales thermiques au pétrole ; le gaz et le charbon s'y substituent progressivement, mais toujours avec production de CO₂ (4). Nous savons que l'épuisement du pétrole est certain avant la fin du XXI^e siècle.

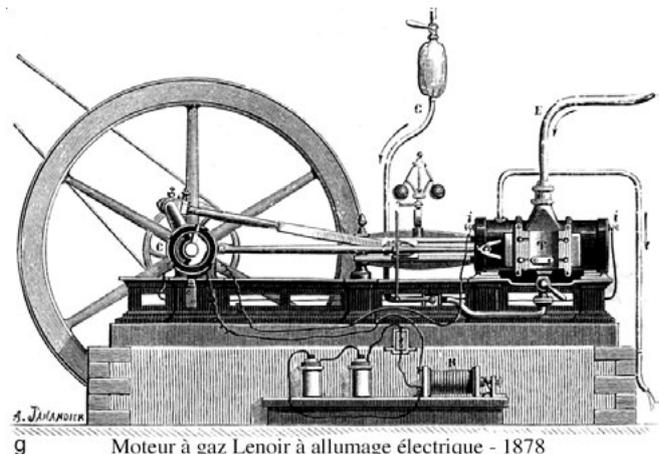
Le pic ou plateau au-delà duquel la production commencerait à régresser suite à l'épuisement des réserves serait entre 2015 et 2030 (f). Il y aurait 40 à 50 ans de réserves prouvées, avec la consommation actuelle, plus aux grandes profondeurs, plus du pétrole et du gaz, dit non conventionnel, imprégné dans des schistes, mais difficile et coûteux à extraire. Après ce seront des hydrocarbures de synthèse fabriqués soit à partir du charbon, soit du gaz naturel, tant que ces ressources ne seront pas épuisées, ensuite de la biomasse, cette dernière solution étant très limitée par la quantité restant disponible après avoir nourri les milliards d'humains. Les prix en seront naturellement bien plus élevés.



Les principales réserves de pétrole sont : au Venezuela pour 18 %, en Arabie pour 16%, au Canada pour 10%, en Iran pour 9,4%, en Irak pour 9%, puis la Russie, l'Atlantique sud, peut être l'Arctique. Les Etats-Unis ont partiellement épuisé leurs réserves prouvées, mais seraient riches en réserves non conventionnelles. L'Algérie et plusieurs riverains de la mer du Nord ont partiellement épuisé leurs réserves de pétrole, moins celles de gaz.

Le gaz, découvert par les anciens chinois, puis l'anglais Murdoch, a été le moyen d'éclairage des villes depuis 1850, progressivement remplacé par l'électricité après 1890. C'était l'un des produits de distillation de la houille dans les « usines à gaz » implantées à la périphérie des cités et distribué par tuyaux souterrains. Le produit restant, le coke, était le combustible indispensable aux hauts-fourneaux pour l'élaboration de la fonte.

Dès l'apparition des premières dynamos vers 1876, on avait un peu d'électricité dans les immeubles urbains en les attelant au premier moteur à explosion, à gaz, inventé par Lenoir et Otto (g). Cette gravure montre un détail, le premier allumage électrique du mélange gaz-air dans le piston, par l'étincelle d'une bougie reliée à une bobine de Ruhmkorff (II-4) et un rupteur.



En tant que source d'énergie mécanique pour l'électricité, le gaz réapparut dans les années 1970, avec la turbine à gaz ou à combustion TAC, convertisseur directement dérivé des turboréacteurs d'avions.

Alimentée avec du gaz naturel ou du pétrole, elle a un rendement mécanique médiocre de 25 à 30% et entraîne un alternateur. Mais les gaz sortant par la tuyère étant encore à plus de 300 °C, cette chaleur est alors récupérée de deux façons :

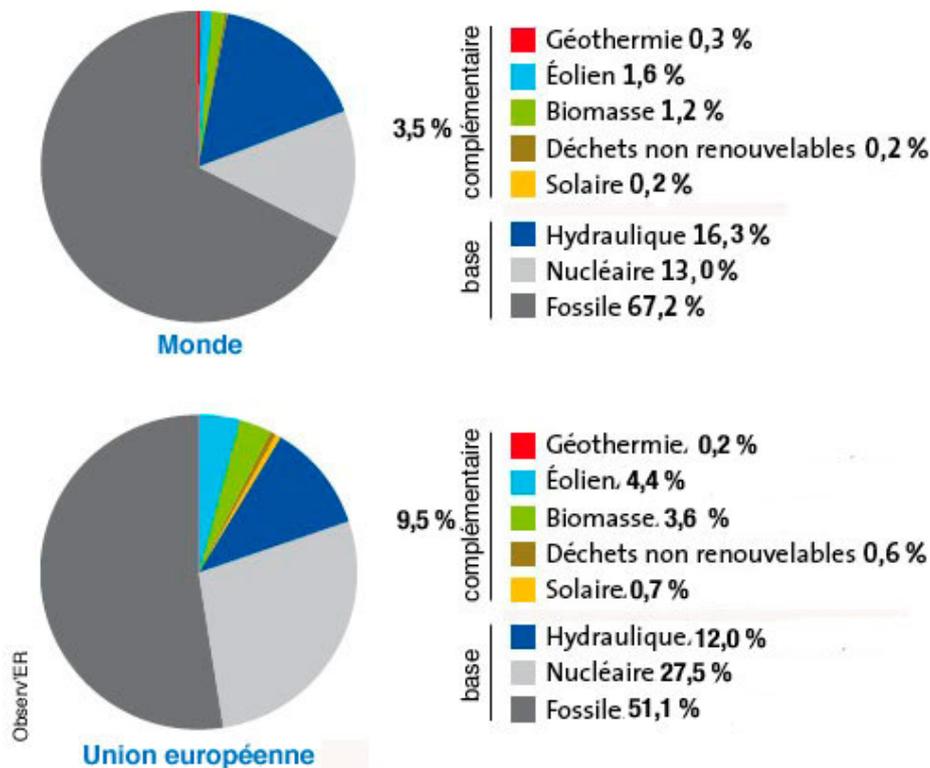
1- pour chauffer de la vapeur turbinée classiquement pour entraîner un deuxième alternateur dont la puissance est la moitié du premier. Le rendement global atteint 55 à 60% parce que le premier groupe récupère une chaleur de combustion à 1200° perdue dans une turbine classique dont la vapeur ne dépasse pas 600°C. C'est le cycle combiné.

2- pour chauffer de la vapeur destinée à un autre processus thermique, pétrochimique ou plus souvent le chauffage de locaux par eau chaude. Son rendement est plus élevé puisqu'on récupère presque toute la chaleur. C'est la cogénération. L'objectif principal est la fourniture de chaleur, la production d'électricité étant un complément.

La turbine à combustion qui était au début un moyen de secours pour couvrir les pointes, grâce à son démarrage très rapide en 10 minutes comme l'hydraulique, devient un moyen de production normal permettant en particulier de remédier rapidement à l'intermittence aléatoire des éoliennes lorsque le vent tombe, ou des futurs champs de capteurs solaires quand passe un nuage. Limitées au début à des dizaines de MW, on construit maintenant des unités puissantes de 500 à 900 MW. Les inconvénients, pollution, bruit et CO₂ étant relativement atténués. Quant aux ressources, ce sont celles limitées du pétrole et du gaz, inéluctablement en voie de disparition à moyen terme.

Chiffres : Les centrales thermiques à gaz produisent 21,7% de l'électricité dans le monde. Les réserves prouvées seraient épuisées environ 10 à 20 ans après le pétrole, soit plus de 60 ans, mais la consommation augmentant sensiblement, surtout par le report des consommations de pétrole, ce délai pourrait se raccourcir. Inversement il pourrait être prolongé par des réserves non conventionnelles. Le problème du CO₂ se pose comme pour les autres sources fossiles, mais en quantité un peu moins élevée.(4)

Structure de la production d'électricité – 2010



h

Sources d'énergie pour la production électrique

Les principales réserves prouvées de gaz sont en Russie pour 23,4%, en Iran pour 16%, au Qatar pour 13,8% . D'importantes réserves, dites non conventionnelles, pourraient être extraites de certaines structures géologiques, mais avec des moyens coûteux financièrement et écologiquement.

Énergies fossiles : Au total en 2010, charbon plus pétrole, plus gaz, 67,2% de l'énergie électrique produite dans le monde était d'origine thermique à flamme, 51,1% en Union européenne (h). Il faut lui ajouter la biomasse, 1,2 % principalement des déchets de bois ou agricoles.

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.

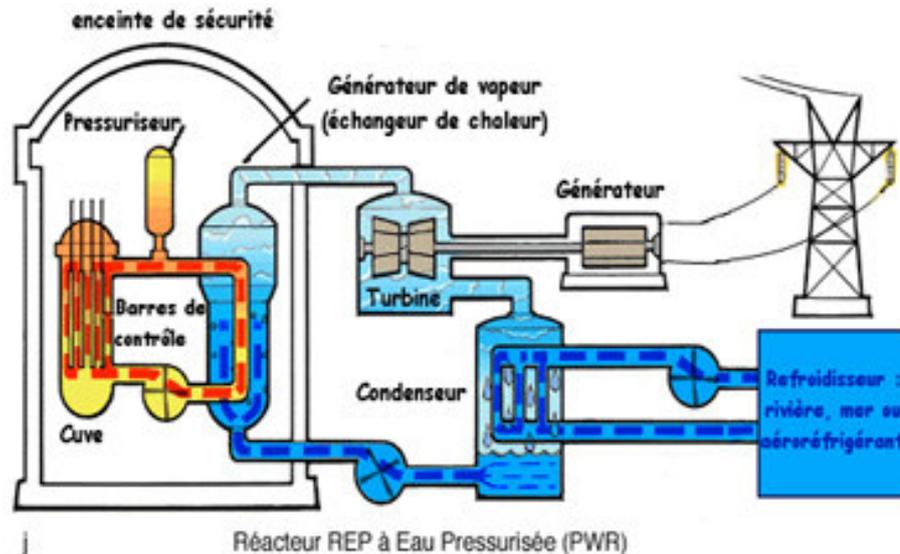
En France, le procédé graphite-gaz à uranium naturel avait été mis au point par le CEA, mais après des années d'essais à Chinon 1962-1967 et de discussions, le choc pétrolier qui fit tripler le prix du pétrole précipita les décisions (II-6). En 1974 était alors démarré un programme important pour remplacer 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 minime. 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.

6) *Les déchets* sont l'autre problème important, il est techniquement résoluble, en raison de leur très faible quantité et de leur rapide décroissance de radioactivité pour 96% du total, mais il est complexe pour plusieurs raisons. D'abord par leur nature et double caractéristique, l'intensité de leur radioactivité et sa rapidité de décroissance (durée de vie) qui sont indépendantes l'une de l'autre. Ils représentent donc au moins 5 familles dont les quantités sont très variables et doivent être traité différemment.

Par ailleurs, une grande partie des déchets (60%) sont les combustibles usagés et des divergences subsistent sur l'intérêt de leur retraitement, qui réduit pourtant leur volume de 96%, en récupérant en plus du combustible réutilisable.

En France, les déchets nucléaires de retraitement sont gérés depuis 1979 par un Établissement public industriel, l'ANDRA. Quant aux solutions, ce sont l'enfouissement, après vitrification, dans des structures géologiques d'argile ou granit, stables pour des millions d'années ; ou bien encore le stockage sécurisé au sol pour les déchets à faible durée de vie, quelques années où jusqu'à 31 ans, de loin les plus importants en volume. Des solutions de transmutation des éléments à très longue durée de vie en éléments à plus courte durée sont envisageables, mais nécessiteraient des réacteurs RNR de IV^e génération.

En Allemagne, le nucléaire étant laissé à des sociétés privées, les déchets ont été stockés et dispersés sans les précautions nécessaires, ce qui a déclenché des manifestations à l'origine de l'arrêt programmé en 2000 du nucléaire pour 2020. Une partie des déchets est maintenant traitée en France, mais des allemands refusent que les 5% restant à enterrer reviennent après traitement.

En Suède et en Finlande, le stockage souterrain est opérationnel, alors qu'en France où il est engagé, on tergiverse.

D'autres pays, tels les Etats-Unis et la Russie, disposant d'importantes étendues quasi désertiques ont adopté provisoirement le stockage sécurisé plutôt que l'enfouissement, vu le faible volume de ces déchets, même non réduits de 96% par retraitement comme en France et en Angleterre. Cependant, aux Etats -Unis, l'enfouissement des déchets militaires de Los Alamos est opérationnel, dans des couches de sel, à Carlsbad au Nouveau-Mexique. Les centrales électriques étant privées, leurs déchets ne concernent pas l'État

7) *Privatisation*

La sûreté est un problème qui n'a pas de prix, affirme-t-on, mais laisser le nucléaire dans les mains de sociétés privées, soumises inéluctablement à des impératifs de rentabilité est un risque supplémentaire. La France avait confié le nucléaire à un service public d'Etat, transformé sous la pression européenne en une société privée soumise aux lois de la concurrence et de la rentabilité, même si l'Etat reste encore majoritaire dans son capital, pour un certain temps. Parmi les autres pays avec un important parc de centrales privées, donc potentiellement plus dangereux, figurent hors du cas particulier de l'URSS, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne, qui prennent ainsi un certain risque.

8) *Problème psychologique*

L'un des difficiles problèmes du nucléaire serait aussi du ressort de la psychologie sociale des foules ; elles concentrent sur cette radioactivité invisible et la menace d'apocalypse de la bombe tout leur rejet des dommages et dangers inhérents à la civilisation industrielle dont elles bénéficient largement.

On dramatiserait plus en France dix irradiés par an, ayant une probabilité même faible d'avoir un cancer, que les 10 accidentés de la route, handicapés à vie, que notre société met dans une charrette, chaque semaine (7). L'automobile serait-elle plus indispensable que l'électricité ?

Toute étude ou débat tourne à la bipolarisation idéologique pour ou contre, cultivée par les médias. Ce n'est pas simple et demande du temps d'explication et de compréhension, ainsi que des connaissances techniques minimales, mais les médias cultivent beaucoup plus l'émotionnel que le rationnel.

Cependant le monstre de Tchernobyl restera longtemps tapi dans l'inconscient collectif, et de plus sème ses mini-crottes radioactives, les déchets à enterrer.

Compte tenu des risques avérés, tout humain non suicidaire pour ses descendants, est naturellement d'accord pour "sortir du nucléaire", mais pour aller où ? Là est le vrai problème de fond que l'on escamote en suscitant des espoirs irréalistes, ignorant surtout le talon d'Achille de l'intermittence aléatoire, tare incontournable des deux formes d'énergies proposées pour le remplacer, éolienne et solaire, sinon par des énergies fossiles à épuisement proche.

Évolution envisageable du nucléaire

La puissance des groupes thermiques nucléaires est identique à celle des groupes classiques, 1000 à 1600 MW. Dans le monde, 440 réacteurs sont en service, dont 58 en France, 80 dans l'ex-URSS, plus de 100 aux Etats-Unis. S'y ajoutent environ 300 navires, en majorité des sous-marins. 30 réacteurs terrestres sont en cours de démantèlement ou démolis dont 4 français, et probablement une cinquantaine de sous-marins.

Le taux de disponibilité est un peu plus élevé, 90 à 95%, que celui des groupes thermiques classiques, le changement des barres combustibles n'étant effectué que tous les un à deux ans. Leur taux ou facteur de charge peut alors être élevé pour diminuer le prix de revient du kWh. (8) En France, il atteint 90 à 95% l'hiver, 65% en été. En 2010 le taux moyen s'établit à 78%.

Le nucléaire que les pays industrialisés ont développés comme une alternative aux combustibles fossiles (épuisement, coût et dépendance politique) a été ralenti pour des raisons économiques et l'accident de Tchernobyl, avec l'espoir d'une autre solution, théoriquement les énergies intermittentes.

Cependant, avec l'épuisement du pétrole et du gaz en fin de siècle, le nucléaire restera avec l'hydraulique et le charbon les seules énergies de base pour la génération d'électricité, les autres énergies renouvelables ne pouvant intervenir qu'en complément, limitées en quantité et surtout leur faible taux de disponibilité aléatoire.

Mais quel type de nucléaire ? Certainement pas les filières actuelles, telle le REP, la plus répandue, bien qu'elle fonctionne depuis 35 ans sur 300 réacteurs avec un seul accident grave sans victime à TMI, il y a 30 ans. Comme toute technique très nouvelle et complexe, celle de l'électricité d'origine nucléaire n'est qu'à son enfance et ne peut progresser que par paliers. Le REP pour le nucléaire, c'est approximativement l'avion à hélice 1935 pour l'aviation. Et puis, les ressources en uranium naturel ne suffiraient pas pour une plus forte consommation, au-delà d'un siècle.

Des pistes d'évolution sont connues, le thorium, plus abondant, pourrait remplacer l'uranium, mais surtout la technique des RNR, réacteurs à neutrons rapides, produisant plus de combustible qu'ils n'en consomment, surgénérateurs, ou hyper renouvelables a été explorée et confirmée, mais le prix du kWh est plus élevé.

Pressentant qu'il faudra probablement reprendre les recherches pour l'amélioration des réacteurs de fission nucléaire, des scientifiques de 12 pays, regroupés au sein du Forum international Génération IV (6), ont sélectionné six filières nouvelles ou concepts sur une trentaine de solutions, basé sur cinq objectifs, sur lesquelles les travaux de recherche et développement seraient menés en coopération internationale vu leur importance et coûts. Trois de ces filières sont des surgénérateurs RNR, fournissant le combustible nécessaire aux autres. Les premiers réacteurs pourraient démarrer 15 à 20 ans après la reprise des recherches, réparties dans les pays participant au Forum, engageant d'importants budgets. Aucune ne l'est actuellement.

Le projet ITER sur la fusion nucléaire n'en fait pas partie, ne pouvant être considéré comme envisageable qu'après sa validation vers 2030, et dans ce cas peu probable, ne pourrait être opérationnel qu'à la fin du siècle. Peut-être jamais, tant que nous ne trouverons pas une technologie ou un convertisseur, capable de transférer l'énergie thermique d'un plasma à 10 millions de degrés,

comme celui du soleil, à un réservoir d'eau pour produire de la vapeur à 500°, nécessaire aux turbines pour faire tourner les alternateurs.

Il a été bien souligné en tête de ce chapitre que le problème n'était pas de trouver de l'énergie, mais des convertisseurs adaptés.

Chiffres : En 2010, 13 % de l'électricité produite dans le monde était d'origine nucléaire, 27,5% dans l'union européenne (h). Les principaux producteurs étant les Etats-Unis pour 31%, la France pour 16,1%, le Japon pour 9,2%...

L'uranium est peu abondant dans le manteau terrestre, environ 3 g par tonne, d'où sa faible radioactivité naturelle. Dans les sites où la concentration le rend exploitable, il y en a un peu plus que ceux d'or et d'argent. Pour la consommation de 500 réacteurs, les réserves d'uranium seraient d'environ un siècle, principalement en Australie pour 22%, au Kazakhstan pour 11,5%, aux Etats-Unis pour 10,3%, au Canada pour 10%, et 21% dans trois pays africains. Les réacteurs RNR, surgénérateurs, seraient donc à prévoir avant, vers les années 2040.

La durée de vie des centrales actuelles, amorties financièrement sur 30 ans, est de 40 et probablement plus avec des rénovations partielles. Pour la génération III, ce serait 60 ans.

Des efforts de recherche longs et coûteux seraient à prévoir si la génération IV s'imposait en l'absence d'autres solutions énergétiques, encore inconnues aujourd'hui.

Les forces naturelles ou énergies renouvelables

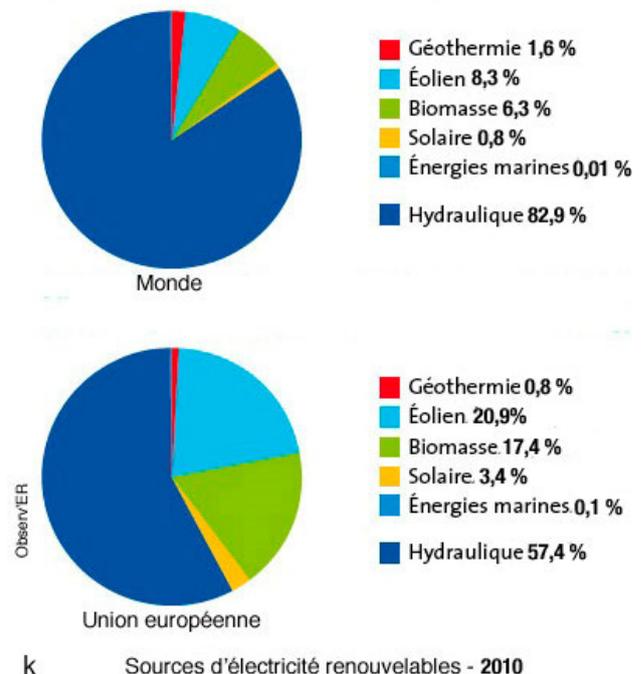
Dès les années 1880, les électriciens qui faisaient tourner leurs génératrices à partir de la vapeur, donc du charbon, ont cherché d'autres possibilités plus économiques et pratiques. La nature leur offrait plusieurs forces naturelles, dans le langage de l'époque, l'hydraulique essentiellement et des tentatives abandonnées vers l'éolien, l'énergie des mers et le solaire thermique. Avant 1960, seule l'hydraulique était largement exploitée.

Dans les années 1980, devant l'épuisement proche des réserves d'énergies fossiles, le réchauffement attribué au CO2 et les inquiétudes sur le danger de l'énergie nucléaire, était apparu le terme *d'énergies nouvelles*, remplaçant les *énergies naturelles* du siècle précédent, en complétant avec le solaire, la géothermie et la biomasse. Un peu plus tard, vu que ces énergies n'étaient pas vraiment nouvelles, sauf le solaire photoélectrique, on les dénomma *énergies renouvelables*, EnR, ce qui permit d'y classer l'hydraulique, de loin la plus importante.

Logiquement on aurait dû y classer aussi les surgénérateurs nucléaires, mis au placard, bien qu'ils puissent générer autant ou plus de combustible qu'ils n'en consomment.

Ce critère de renouvelable constitue une catégorie d'énergies hétérogènes, inutilisables en énergie de base, peu comparable tant sur leur potentiel de développement, coût et intermittence.

L'hydraulique, la plus ancienne énergie naturelle, renouvelable, mais différente des autres en tous autres points, pèse très lourd dans le panier des EnR ; elle y représente 82,9% dans le monde et 57,4 % dans l'U.E. (k).



C'est un avantage si l'on veut démontrer l'importance globale des renouvelables, mais un inconvénient si l'on veut analyser leur accroissement, car le potentiel restant à équiper en hydraulique est insignifiant en Europe comme aux USA.

Il serait bien plus clair et logique de classer l'hydraulique avec les énergies ayant des caractéristiques proches, les énergies de base, et placer les autres énergies renouvelables dans le groupe des énergies complémentaires, en particulier les intermittentes qui ne peuvent pas, par nature, constituer une énergie de base, nécessairement à disponibilité prévisible.

L'hydraulique

C'était la plus ancienne source naturelle, assez abondante et pratique à capter avec les antiques roues hydrauliques. L'invention de la première turbine, celle de Fourneyron en 1827, avait fortement accru le potentiel exploitable qui restait cependant en grande partie inutilisé jusqu'en 1890, faute de pouvoir transporter l'énergie mécanique obtenue, loin de la turbine. L'électricité levait ce handicap (IV-2), dès les premiers essais, puis le premier grand équipement du Niagara en 1895 (IV-4)

L'hydraulique devint alors une énergie de base, exploitée en parallèle avec l'énergie thermique du charbon, dans les régions où elle était disponible, le long des cours d'eau, ou la houille blanche en montagne.

La puissance théorique d'un équipement est définie par la hauteur de chute, multipliée par le débit d'eau ; une chute de 10 m de hauteur, avec un débit de 10 l par seconde fournit 1 kW. Si c'est une cascade inutilisée, cette énergie mécanique se transforme surtout en chaleur et élève la température de l'eau de 0,24 °C.

Elle a presque toutes les qualités requises comme source d'énergie électrique de base, en particulier un taux de disponibilité presque permanent et prévisible pour répondre instantanément aux besoins fluctuant d'électricité, s'y ajoutant une possibilité de stockage dans les retenues des barrages pour l'électricité de pointe.

Ses différentes formes d'équipement permettent, soit des centrales au fil de l'eau sur les cours d'eau, fonctionnant en permanence avec un barrage de faible hauteur, soit en montagne des barrages de retenue, accroissant la hauteur de chute et pouvant stocker l'eau en altitude pendant les périodes creuses, puis la turbinant aux heures de pointe et l'hiver.

S'y ajoutent des centrales d'accumulation par pompage ou STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) installées dans des sites montagneux propices entre deux lacs artificiels d'accumulation à des altitudes très différentes, au moins 500 m, reliés par des conduites forcées. La première, celle de Ruppoldingen, a fonctionné en Suisse de 1904 à 1960. Elles consomment de l'électricité pour leurs pompes/turbines spéciales remontant l'eau depuis le lac inférieur dans la réserve haute, lorsque le réseau est peu chargé, par exemple la nuit ; aux périodes de pointe, le soir, cette eau est redescendue avec turbinage, dans le lac inférieur. L'électricité produite, renvoyée au réseau, l'est en quantité naturellement moindre que celle consommée au pompage. Le rendement global atteint 75 %.

La plus puissante centrale de ce type fonctionne à Vaujany dans les Alpes françaises. Sa puissance de 1800 MW équivaut à celle de deux groupes thermiques, mais elle ne produit de l'électricité de pointe que quelques centaines d'heures par an. Son paradoxe apparent est de consommer plus de kWh qu'elle n'en produit...mais n'ayant pas la même valeur !

La production avec pompage, bien que développée en France, reste marginale, 10% de l'hydraulique, soit 1,2 % du total, en raison de son coût d'équipement et surtout de la difficulté de trouver des sites montagneux adéquats. Les pays les plus équipés en STEP sont les Etats-Unis, le Japon, la Chine.

Chiffres

En 2010, l'hydraulique fournissait 16,3% de l'électricité produite dans le monde, 12% en union européenne (h). Ce taux relatif baisse même en Europe où l'accroissement annuel de production totale est de 0,5 à 1,5%, alors que les nouveaux équipements hydrauliques sont rares.

Les principaux producteurs mondiaux sont la Chine pour 17,6%, le Canada pour 11,4%, le Brésil pour 12%, les Etats-Unis pour 9,3%. En Europe, la Norvège en produit 4 %, la Suède 2,1%, la France 2.1%.

Dans le monde, le potentiel en hydraulique encore techniquement et économiquement exploitable est estimé à 5400 TWh/an, le quart de la production totale actuelle. En Europe et Amérique du Nord, pratiquement tout a été équipé. Il ne reste que des petites installations de micro-hydraulique.

Par contre, Il reste un fort potentiel dans les grands fleuves d'Afrique centrale 17%, d'Amérique du Sud 20%, et surtout en Asie 50%, mais très éloignés des centres de consommation, nécessitant de longues lignes de transport CCHT, coûteuses.

Pratiquement pas d'effort de recherche n'est à envisager en hydraulique.

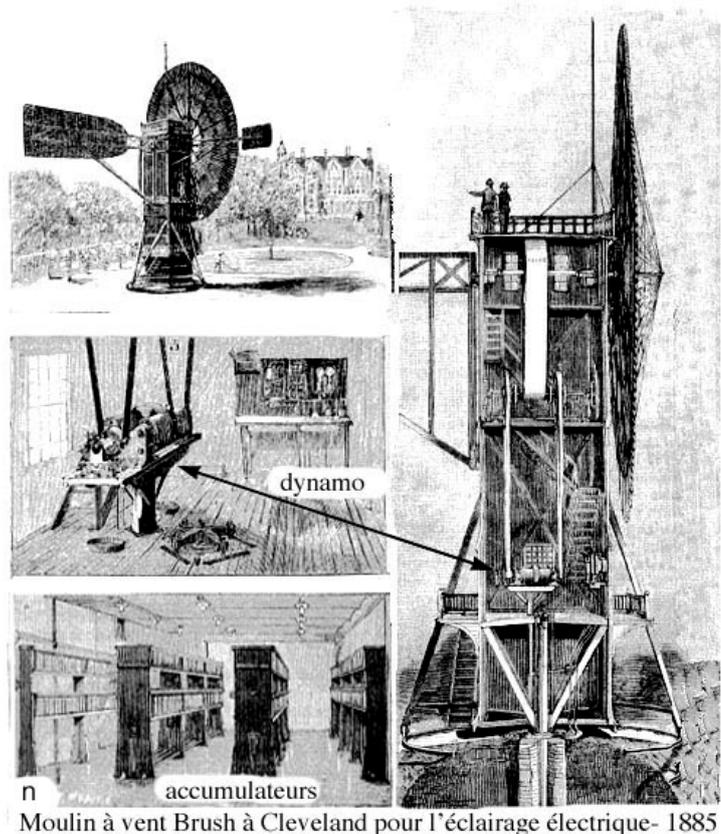
La durée de vie des équipements est longue, 60 à 80 ans, plus pour le génie civil. La probabilité de rupture d'un barrage est d'un par an pour plus de 12000 barrages importants dans le monde, moins dans les pays industrialisés.

Comme dans toute technique nouvelle, les premiers accidents sont généralement les plus graves, ainsi la première rupture de barrage, celle de Johnston, Pennsylvanie, en 1889 fit 10 000 morts. Ce n'était d'ailleurs pas un barrage à objectif hydroélectrique.

L'énergie éolienne

Comme l'hydraulique, elle était utilisée depuis l'Antiquité, pour la navigation à la voile ou animer des moulins à vent pour divers usages mécaniques. Les Pays-Bas l'ont apprécié pendant des décennies pour pomper l'eau de leurs polders, gagnés sous le niveau de la mer. C'est une énergie intéressante pour produire de l'énergie mécanique admettant son intermittence, mais peu pour produire de l'électricité qui doit être disponible en permanence.

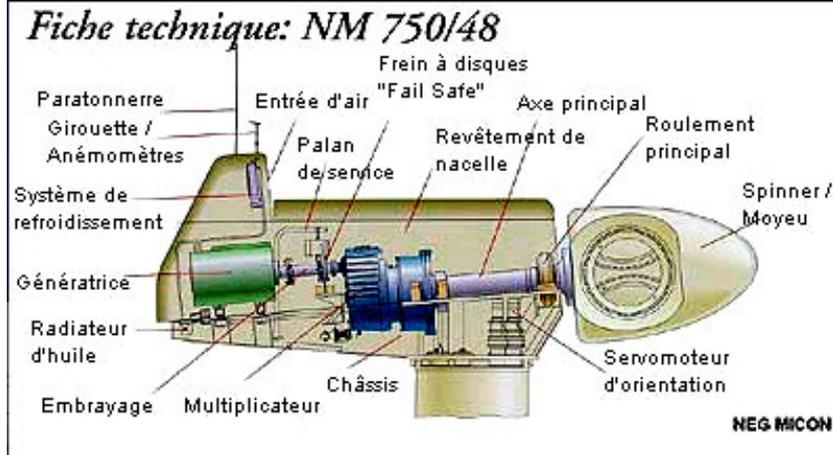
Cependant quelques installations d'éclairage ont été conçues avec un indispensable stockage partiel de l'électricité produite, sous forme électrochimique dans des accus, quand le vent soufflait dans la journée. À la tombée de la nuit, ils participaient à l'éclairage si le vent était trop faible ou nul. Ainsi fonctionnait l'installation de modeste puissance réalisée par Brush à Cleveland en 1885 (n).



Depuis plus d'un siècle, le développement des aérogénérateurs électriques a été très limité, sauf cas particuliers, car même avec stockage partiel, cela ne suffit pas, dans toutes régions l'absence de

vent peut durer des jours ou des semaines. La contrainte absolue, inhérente à toute génération d'électricité est la continuité de service.

Vers 1985 l'idée fut reprise, bien qu'aucun élément nouveau ne soit apparu pour remédier au problème majeur de disponibilité, imposant un stockage important de plusieurs jours, et malgré cela, les éoliennes sont l'objet d'un fort engouement dans nombre de pays. Les raisons sont en principe écologiques, surtout d'intérêt financier, par dérogation, provisoire ?, des règles de concurrence imposées sur tout produit, dont l'électricité en Europe.



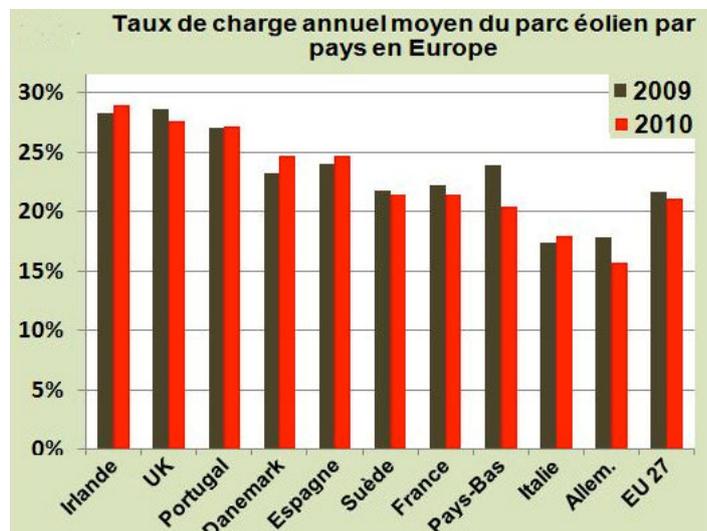
Sur le plan technique, les éléments étaient connus ; pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, les anciennes pales des moulins furent remplacées par des hélices d'hélicoptères, moteur bien au point, reliées à un multiplicateur de vitesse mécanique pour faire tourner le générateur à 1500 t/min. Comme tous les systèmes à hélice, hélicoptère ou navire, un procédé d'orientation des

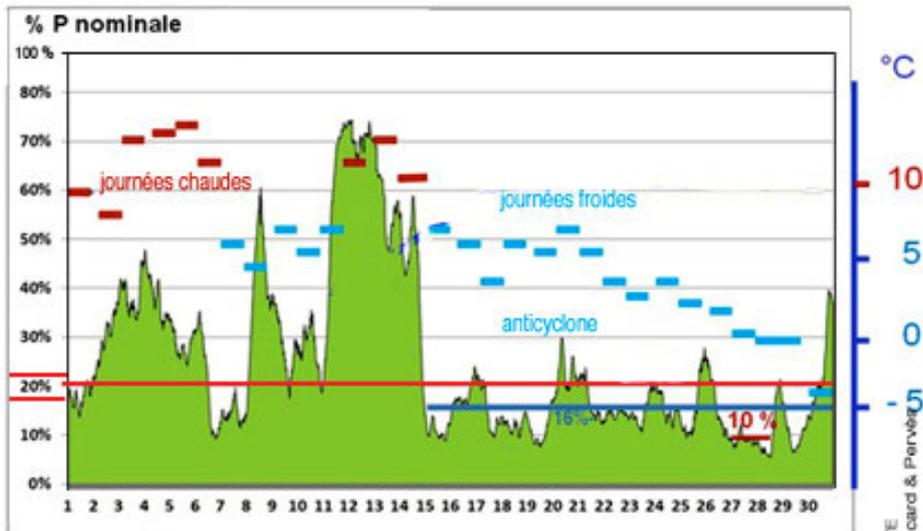
pales permettent d'optimiser la puissance pour une vitesse de rotation à peu près constante. Pour la conversion en électricité, un générateur asynchrone à enroulement rotorique est généralement adopté pour sa relative simplicité, mais il doit être connecté au réseau pour démarrer. Des progrès ont été faits pour rapprocher l'adaptation aux réseaux des éoliennes de puissance de celle des générateurs synchrones des centrales. La machine asynchrone est pilotée par un convertisseur statique avec deux onduleurs symétriques d'une puissance réduite, environ 25%, connectée au rotor permettant de remédier aux variations de fréquence, tension et énergie réactive (o)(p). L'éolienne démarre à partir d'un vent de 20 à 30 km/h, fournit sa puissance maximale à partir de 50 km/h et stoppée se déconnecte par sécurité à 90 km/h. Pour alimenter un réseau indépendant, sans autre source, il faut utiliser un générateur classique, synchrone, soit à aimants permanents, soit avec une source de courant continu pour l'excitation. C'est plus compliqué et onéreux. La mise en service successive de chaque éolienne nécessite alors un système de synchronisation de fréquence.

Le fort développement des éoliennes depuis une dizaine d'années semble ignorer leurs limitations techniques et financières. Il paraît utile de les analyser, vu les espoirs que l'on fonde sur cette énergie.

L'intermittence aléatoire, talon d'Achille de l'éolienne

Malgré des avantages notables, énergie primaire gratuite, pas de CO₂, l'énergie éolienne est fortement pénalisée par cette intermittence du vent, lui donnant un taux de disponibilité moyen de 2200 h en France, permettant un facteur de charge annuel d'environ 20% (8). Le facteur constaté en 2010 par RTE a été de 19,3% en France, 15,3% en Allemagne, 24,2 % en Espagne.

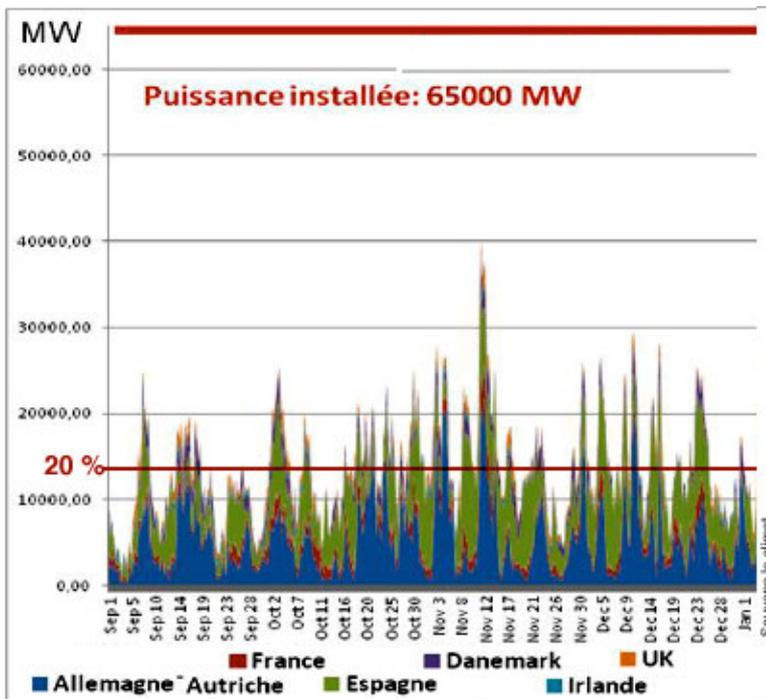




p2 Variation journalière de la puissance éolienne P, totale France, novembre 2010

Le diagramme (p2) d'un mois de novembre généralement bien venté illustre cette intermittence, déjà lissé par le foisonnement entre les trois gisements de vent du territoire français, pas toujours venté au même moment. Après 4 jours de forts vents où le total des éoliennes a atteint 70% de sa puissance, un anti-cyclone froid a réduit la production à 16% moyens pendant 2 semaines.

On pourrait estimer qu'au niveau de l'Europe, l'effet de foisonnement serait renforcé, par le transfert instantané d'énergie éolienne des pays bien ventés à ceux qui le sont moins, sous condition d'un renforcement considérable des réseaux de transport et des pertes associées. Cette situation est figurée sur le diagramme (p3), cumul des productions de 7 pays pendant 4 mois d'hiver. La moyenne journalière ne dépasse guère la barre des 20%. Donc le renforcement du réseau d'interconnexion serait une dépense sans intérêt sur ce point.



p3 Empilement des productions éolienne en Europe de l'Ouest de septembre à décembre 2010

Un taux de disponibilité aussi faible, aggravé par sa nature aléatoire et sans stockage possible de l'énergie primaire, rend difficile l'intégration de cette énergie pour le gestionnaire de réseau travaillant en temps réel. Aussitôt que le vent local la produit, il doit réduire instantanément ses autres sources de production programmées 24h à l'avance. Manœuvre inverse quand le vent tombe. Tant que le quota de cette énergie n'est que de 1 à 2% de la production totale, ces fluctuations aléatoires sont résorbées comme les fluctuations normales de consommation.

Mais ce handicap limiterait la part moyenne annuelle de kWh éolien dans un réseau à environ 15% de la production totale, d'après les électriciens canadiens et allemands (E.ON), de 20% selon les espoirs d'autres, avec des adaptations conséquentes et coûteuses. (9). Au-delà, le gestionnaire du réseau risque de ne pas pouvoir faire face à des instabilités déclenchant un black-out (IV-4, c.3)

Il en résulte des conséquences techniques et économiques pénalisantes, variables suivant la structure des réseaux et l'objectif visé par l'installation d'éoliennes.

Cas 1- L'éolien doit apporter un appoint d'énergie dans un réseau, ou doit limiter le CO₂ émis par les énergies fossiles. Le gestionnaire de réseau doit disposer pendant le fonctionnement des éoliennes, 20 à 25% du temps, d'une réserve de régulation rapidement disponible, en une dizaine de minutes. RTE souligne : Pour maintenir en permanence l'équilibre entre la production et la consommation, il faut disposer à tout moment d'une réserve de production disponible rapidement. La production éolienne ajoute un aléa sur cet équilibre qui accroît le besoin de réserve de production.

Le principal gérant de réseau allemand EON, qui a plus de dix ans d'expérience sur le sujet, considère qu'il faut une réserve de régulation disponible de 90% de la puissance installée en éolienne. En Allemagne et autres pays charbonniers, la réserve est naturellement constituée par les centrales thermiques à flamme majoritaires pour la production de base, ou de turbines à gaz à démarrage rapide, normalement prévues pour couvrir les pointes.

Mais dans des pays comme la France, où la production de base est hydro-nucléaire, la réserve ne peut être l'hydraulique de barrage, réservée prioritairement à la couverture des pointes prévues, ni le nucléaire, pas adapté économiquement et techniquement pour subir de rapides variations de charge. D'où nécessité d'augmenter le parc réduit au minimum (10%) de centrales thermiques de régulation, réservées aux pointes normales, soit à charbon, soit des turbines à combustion au gaz, donc avec production de CO₂.

Ce qui conduit à un **paradoxe** : l'éolien (comme le solaire) permet de réduire le dégagement de CO₂ dans les pays générant leur électricité avec des combustibles fossiles, par contre dans les pays générant leur électricité avec le mix hydro-nucléaire, l'éolien accroît le CO₂

En plus, il faut un double investissement, celui de l'éolienne pour 1/5 ou 1/4 du temps et celui de la centrale de régulation pour les 3/4 restants. Résultat : l'énergie fournie par l'éolienne au réseau ne sert qu'à économiser le combustible de la centrale de réserve ; ses frais fixes d'investissement et de fonctionnement n'étant plus compensés par la vente de kWh. Dans une économie libre, le réseau n'aurait à payer au fournisseur d'éolien, quand ses machines fonctionnent, uniquement le prix du seul combustible économisé par la centrale de réserve soit, 2,5 à 3 c€/kWh pour du gaz, en 2009.

Cas 2 - Si l'objectif est de remplacer une puissance de centrales thermiques, à combustible fossile générant du CO₂ ou nucléaires, fonctionnant en base, c'est-à-dire près de 80% du temps, il faut arithmétiquement installer une puissance d'éolienne 4 à 5 fois supérieure, puisqu'elle ne fournirait ses kWh que 20 à 25% du temps.

RTE, gestionnaire en France du Réseau de Transport Électrique précise : *Sous réserve d'un développement géographique équilibré, 20 000 MW en éoliennes est équivalent à 4000 MW de moyens de production thermiques (à flamme ou nucléaire), mais en estimant que 1/5 du parc soit toujours venté (10).*

La conséquence de ce talon d'Achille de l'énergie éolienne, pour fournir le même nombre de kWh annuel qu'une centrale thermique, nécessite un coût d'investissement multiplié par 4 à 5.

Ainsi, en 2010, le coût unitaire de l'éolien à 1,3 M€ le MW devient d'après RTE, 5 fois plus élevé, soit 6,5 M€ par MW installé, à production égale de kWh.

Pour comparaison, la centrale thermique dont le coût est le plus élevé, une tranche nucléaire nouvelle type EPR de 1600 MW reviendrait à 3 G€, porté à 6 G€ pour un début de série, soit 3,8 M€ par MW.

L'éolien coûte ainsi en investissement 70% plus cher que le nucléaire de génération III, pour produire le même nombre de kWh annuel. Sous la condition que les machines soient réparties sur des sites éloignés pour que le vent souffle en permanence sur au moins 1/5 des sites. D'où accroissement des lignes de transport et des pertes.

Pour l'éolien offshore, il est question d'un coût unitaire doublé par rapport au terrestre avec une production un peu plus élevée, son taux de charge annuel passant de 20 à 25%.

Obligation d'achat (OA)

Malgré un investissement unitaire peu élevé, l'éolien doit s'amortir sur une production en kWh, cinq fois plus faible que celle du thermique de puissance identique ; aussi cette énergie serait restée invendable à un prix concurrentiel compte tenu de son intermittence aléatoire, si les gouvernements européens n'avaient pas imposé une mesure financière exceptionnelle :

L'obligation d'achat de la production éolienne par le gestionnaire du réseau national lui a été imposée à un prix bien plus élevé que celui de toutes autres sources d'énergie. Ce prix (2010) est en France de 8,2 c€/par kWh pour des installations terrestres et 13 c€/kWh pour les installations offshore. En Allemagne, le prix de rachat est de 9,2 c€/kWh pour le terrestre et 9,7 c€ pour l'offshore. À comparer au prix de 3,5 à 4 c€/kWh du nucléaire en sortie de centrale, ou au prix moyen de 5 c€/kWh de l'énergie négociable sur la bourse européenne Powernext. Ce prix est fixé pour de l'énergie livrée le lendemain ou plus à une heure et en quantité déterminée, condition impossible à respecter par l'éolienne. Ainsi, l'énergie éolienne, dans un marché libre, serait invendable, plombée par son intermittence aléatoire.

Son surcoût, pris en charge par les distributeurs d'électricité, est répercuté sur le prix du kWh facturé à l'ensemble des usagers, étant inclus dans la taxe CSPE, de 5% en 2010, portant le prix à 0,107 €/le kWh en France.

La moyenne de l'U.E. est à 0,141 €/kWh, en Allemagne, à 0,183 au Danemark à 0,236, pays très équipés d'éoliennes et solaire.

Il était attendu que ce soit dans les pays dont la production électrique est assurée surtout par énergies fossiles que se développe l'éolien, soit la majorité.

À l'inverse, les quatre pays européens produisant leur électricité sans CO₂, à partir d'un mix variable d'hydraulique et de nucléaire, Suisse, Suède, Norvège, France, n'ont pas besoin des inconvénients et du surcoût de l'éolien, mais la France fait exception. (11).

Météo

La dépendance des énergies renouvelables intermittentes à la météo est une difficulté pour leur insertion dans le réseau. Le vent, prévisible approximativement la veille peut devenir nul pendant plus d'une semaine pendant les anticyclones d'hiver ou d'été, alors qu'un besoin d'énergie exceptionnel est nécessaire, l'hiver pour le chauffage d'appoint, l'été pour la climatisation. L'Allemagne a eu plusieurs pannes pendant l'épisode de grand froid en 2001 et la canicule de 2003.

De même la Corse, île électriquement autonome, a dû procéder à des coupures programmées pendant presque un mois de l'hiver rigoureux de 2007, alors que ses 18 MW d'éoliennes restaient dans l'anticyclone, sans vent. Un groupe électrogène de 20 MW, inutilisé après les JO a été acheminé par mer depuis la Grèce pour les remplacer. Ce qui coûte le plus cher avec l'éolien, ce sont ses longues absences imprévues, les semaines d'anticyclone, hiver comme été.

En France, RTE a demandé à Météo-France de concevoir un logiciel spécifique pour minimiser les aléas de la prévision du vent à 24 h au moins.

Énergie diffuse et commandabilité

L'énergie éolienne, comme d'autres énergies naturelles, soleil, vagues, marée, est une énergie diffuse, ce qui présente bien plus d'inconvénients que d'avantages. Ce n'est pas comme l'hydraulique, seule énergie naturelle de l'eau des pluies et neiges tombant aussi d'une façon très diffuse sur les montagnes. Mais la nature nous la concentre gratuitement par ses ruisseaux, rivières et fleuves, où nous plaçons nos turbines recueillant une puissance aussi forte que possible sur un très faible espace.

La concentration a toujours été recherchée pour la plupart des activités humaines, même avant l'industrie, pour de multiples raisons pratiques et économiques. Pour l'électricité, la multiplication des

centres de production augmente leur coût global d'investissement et de fonctionnement ainsi que le nombre de lignes de raccordement au réseau, coûteuses si elles ne fonctionnent qu'au plus 25 % du temps pour des éoliennes. Surtout le gérant du réseau a besoin de pouvoir faire appel journalièrement à tous ses fournisseurs ou les couper en fonction de ses besoins.

Pour gérer cet équilibre en temps réel, il faudrait que les centres de production intermittente soient « commandables » depuis les centres régionaux, comme toutes les autres centrales. Ce n'est pas le cas pour 95% des 400 sites éoliens de petite puissance (<10 MW) raccordés, en 2009, en France au réseau de distribution 20 kV et trop dispersés. On ne peut donc pas moduler leur production pour l'adapter aux besoins ; il est surtout nécessaire de pouvoir les arrêter, lorsqu'il y a surproduction. Système partiellement établi en Allemagne et Danemark, des groupes d'éoliennes produisant en permanence peuvent être rapidement être arrêtés en cas de surcharge du réseau, afin de ne pas avoir à revendre la surproduction à des prix de solde très bas. Il en est résulté une baisse du taux de charge allemand de 18,5% à 15,4%, entraînant celle de leur rentabilité.

Cette commandabilité permettra de gérer un peu mieux la production intermittente dans des réseaux dits intelligents (smart grid) dont la gestion informatique serait améliorée par l'acquisition de nombreux paramètres jusqu'au compteur des abonnés. Ce compteur, dit intelligent, ayant l'avantage principal pour le distributeur d'être relevé à distance, d'où sensible économie de personnel.

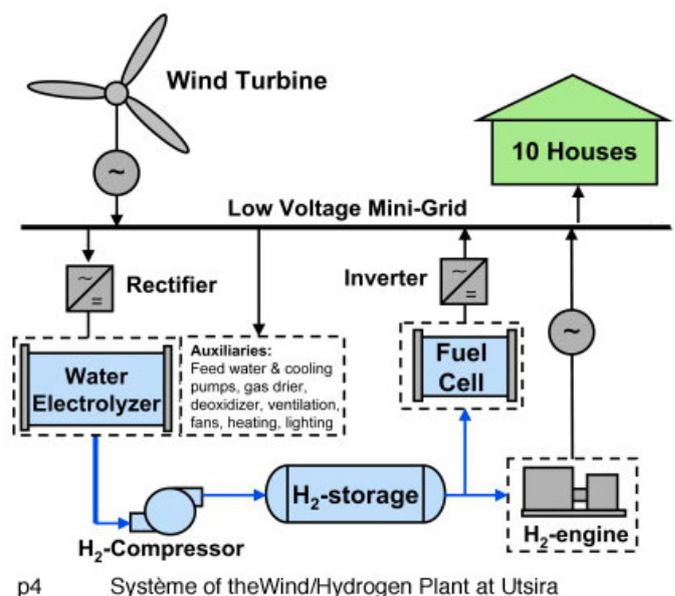
Stockage

Il est surprenant que les médias s'étendent longuement sur l'inconvénient d'ordre esthétique des éoliennes, tout en ignorant le plus grave, leur intermittence aléatoire sur le plan fonctionnel. Pour compenser partiellement cet inconvénient majeur, il faudrait stocker quand le vent souffle et que le réseau n'a pas besoin de cette énergie supplémentaire. Ensuite la réinjecter au réseau aux périodes de forte consommation.

Beaucoup imaginent un réseau électrique comme un réservoir d'eau que l'on remplit d'un côté depuis les sources, et vide de l'autre vers les usagers aux besoins variables ; le stockage partiel dans le réservoir jouant le rôle de tampon d'équilibre. Cela marche bien pour l'eau, malheureusement pas pour le vent ni l'électricité.

L'électricité ne se stocke pas directement et doit être produite à chaque instant en quantité exactement identique à celle qui est consommée. Contrainte inéluctable que les électriciens arrivent à résoudre, mais en la produisant avec des sources commandables et dont la disponibilité est prévisible. On cherche depuis plus d'un siècle des modes de stockage de l'électricité (II-1). Le stockage direct ne peut se faire qu'en courant continu dans des condensateurs, ou inductances, et en quantité très faible (12). En indirect, la transformation de l'énergie électrique en énergie électrochimique dans les accus, la plus classique, s'est améliorée, mais reste onéreuse et très insuffisante en quantité.

Il est aussi envisagé de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse avec l'électricité éolienne ou solaire, de le stocker pour le transporter au loin, ou mieux de le retransformer en électricité sur place pour le réinjecter dans le réseau, lors des longues pannes de vent. Cette électricité serait produite soit des piles à combustible, soit par un groupe



moteur thermique à hydrogène actionnant un générateur électrique. Plusieurs installations d'essais ont été construites.

L'une des plus significatives est celle de l'île d'Utsira en Norvège (p4). L'électricité générée par les piles ou le moteur à hydrogène attendrait 25 à 30 % de celle générée par les éoliennes. Donc d'un coût trois fois plus élevé, sans compter les problèmes risqués du stockage et transport d'hydrogène hautement explosif. (13)

D'autres procédés ont été expérimentés, mais vite limités par diverses contraintes, telle l'eau dans les stations de pompage, STEP, le plus efficace connu, en quantité d'énergie stockée, à longue durée, appliqué depuis près d'un siècle en France. Ces stockages coûteux nécessitent des sites montagneux appropriés assez rares, avec deux lacs-réservoirs proches, l'un en altitude, l'autre le plus bas possible. Les plus rentables sont déjà aménagés pour couvrir déjà les pointes normales des réseaux (jour/nuit, été/hiver, jours ouvrés/chômés). Heureusement les pointes journalières, les plus contraignantes, tendent à se réduire naturellement depuis plusieurs décennies. La pointe jour/nuit qui était de 4 fois en 1900 est maintenant bien inférieure à 2 fois.

Le rendement global avec des turbines-pompes réversibles est acceptable, de 70 à 75%, mais l'investissement est élevé : deux barrages réservoirs, la centrale de turbines-pompes, la conduite forcée de liaison et la ligne électrique de raccordement au réseau. Le kWh renvoyé au réseau étant plus cher, pour l'amortissement de la STEP, incite à ne stocker que du kWh à bas prix, par exemple celui du nucléaire d'heures creuses.

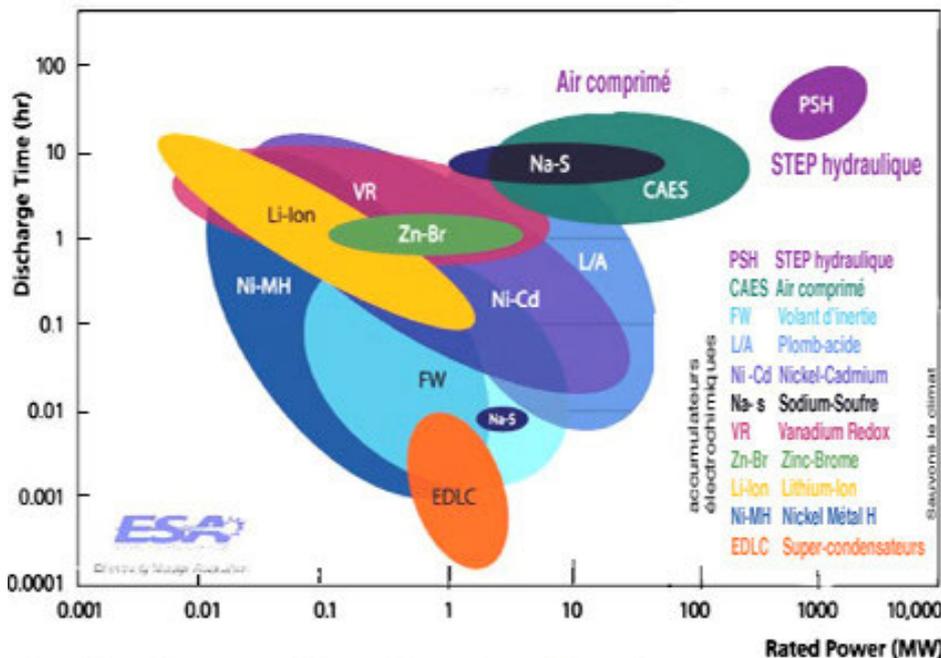
Il faudrait plutôt créer des STEP réservées à l'éolien et proches des sites ventés, généralement en bord de mer. Facteur favorable, la mer constituant gratuitement le réservoir inférieur et le relief élevé d'une cote permettant d'y établir le réservoir supérieur. En France, s'y prêteraient les cotes de Corse, Alpes du Sud, falaises de Bretagne et Normandie.

Autre moyen de stockage ancien (tramway), l'air comprimé, est stocké en Allemagne, à Hunthorf, dans d'anciennes mines, puis utilisé pour l'alimentation de turbines à gaz. Le rendement n'est que de 42 %, l'air s'échauffant à la compression et se refroidissant à la détente. Théoriquement, en adiabatique il serait de 68%, mais presque impossible à réaliser dans ce cas.

À petite échelle, on peut aussi stocker la chaleur dans des sels fondus ou céramiques, mais en retrouvant la fatalité d'un rendement thermodynamique de 30% au mieux à la reversion en électricité.

Encore aucune solution nouvelle capable de stocker l'électricité en indirect, n'a encore été trouvée, répondant aux critères techniques et économiques exigés pour un réseau :

1) Rendement acceptable obtenu par une conversion réversible avec la même machine. C'est le cas de l'accumulateur et de la STEP, pas celui de l'hydrogène



p5 Efficacités des moyens opérationnels de stockage de l'électricité : puissance et temps de décharge

2) Capacité de stockage élevée, une dizaine de MWh au moins

3) Une durée de stockage d'au moins une semaine. (p5)

Le stockage de l'énergie éolienne, c'est encore du vent, écrit René Delbecq. Le même problème se pose pour le solaire

Chiffres : En 2010 l'électricité d'origine éolienne représentait 1,6% dans le monde, avec un taux d'accroissement de 27,1% par an. Les principaux pays producteurs étant les Etats-Unis pour 26,5%, l'Allemagne pour 14,1%, l'Espagne pour 13,7%, la Chine pour 10,4.

Elle représentait 4,4 % de la production de l'Union européenne.(h)

La technologie de l'éolienne ne nécessite pas de recherches nouvelles. Seul le problème crucial de l'intermittence vaudrait bien qu'on y consacre de l'argent au stockage, mais pas selon la méthode, coûteuse et peu efficace actuelle, le perfectionnement des procédés connus. mais il faudrait d'abord trouver de nouvelles pistes de recherches à approfondir, malheureusement pas encore découvertes. À noter que le problème touche encore plus l'électricité solaire.

La durée de vie des éoliennes serait de 20 ans, chiffre assez pessimiste qui paraît faible compte tenu de la technologie mécanique et électrique classique et qu'elles sont à l'arrêt 75 % du temps.+

La biomasse

On regroupe sous ce terme des combustibles solides, principalement le bois et ses déchets, ou ceux produits par l'agriculture, transformés en gaz combustible obtenu par dégradation naturelle accélérée, la méthanisation.

Une partie de la biomasse est utilisée directement sous forme thermique ou dans les moteurs. En France, on se souvient des autocars à gazogène qui montaient difficilement les côtes dans les années de pénurie d'essence 1941/45. Le reste est brûlé dans des centrales thermiques, la vapeur faisant tourner d'une façon classique turbine et générateur.

Chiffres : C'est la deuxième des énergies renouvelables en 2010, soit 1,2% de la production mondiale et 3,6% de celle de l'Union européenne, à peine moins que l'éolienne, bien plus économique en investissement, sans intermittence aléatoire, avec une disponibilité donnant un facteur de charge assez élevé de 30 à 40%. (h)

Au plan mondial, les principaux pays producteurs sont les Etats-Unis pour 55%, L'Allemagne 34%, le Brésil 29%, le Japon pour 12%, le Royaume-Uni pour 11%... la France pour 4%.

La France est très en retard pour cette production, avec 0,8% pour sa production électrique globale, l'un des derniers pays européens, alors qu'elle a d'importantes forêts en régions montagneuses, mais encore mal gérées pour transformer tous les déchets en énergie électrique. Les investissements sont pourtant peu élevés et l'obligation d'achat à un prix un peu supérieur à celui de l'éolienne, pour une énergie de meilleure qualité, son intermittence étant prévisible.

L'énergie géothermique

Pour générer de l'électricité, il faut de la vapeur chaude, au minimum à 200° C, qui ne peut être produite que dans les régions volcaniques, on la qualifie de géothermie à haute température. De l'eau est injectée dans le sous-sol, elle ressort sous forme de vapeur pour faire tourner des turbines.

Le procédé fonctionne dans une dizaine de pays à volcanisme actif.

Le terme de géothermie à basse température, inférieure à 100° C, qualifie divers systèmes d'extraction de la chaleur du sous-sol non-volcanique, ils ne peuvent pas produire d'énergie électrique, mais en dépensent un peu pour leurs pompes.

Cependant, l'un de ces systèmes, la pompe à chaleur (PAC) sol/sol extrayant la chaleur du s/sol, et la restituant vers 25 à 40° dans la dalle d'une maison, est une sorte d'amplificateur qui permet de

chauffer des locaux en dissipant 3 kW de chaleur avec 1 kW d'électricité dépensé par le compresseur (2). Son développement lent dans les années 1980 tend à s'intensifier.

Chiffres : En 2010, l'électricité d'origine géothermique couvrait 0,3% de la production mondiale, 0,2% de celle de l'Union européenne (h).

Les principaux pays producteurs sont : Etats-Unis 16%, Philippines 10%, Indonésie 7%, Mexique 7 %, Italie 5%, Islande 4,6%. Des développements limités sont encore envisageables, surtout en Indonésie où les ressources assez importantes sont peu exploitées. Pas de recherches à envisager.

L'énergie solaire

Sous sa forme thermique, la plus simple, pratique et économique à utiliser en abondance, cette énergie est naturellement exploitée, mais très insuffisamment. Elle n'est pas transportable, sinon après conversion onéreuse en électricité.

La découverte de la photo-électricité, production directe d'électricité à partir du rayonnement solaire, et ses premiers développements ont été relatés en II-2. En résumé, la transformation photoélectrique avec le sélénium fut révélée en Angleterre en 1876 par Adams et Day, puis les cellules réalisées par Siemens et Fritts en 1885 qui ne donnaient qu'un faible courant, juste suffisant pour les photomètres de photographie. Puis en 1948, ce fut la découverte des semi-conducteurs. Le silicium, le plus utilisé, s'avéra bien supérieur au sélénium comme générateur photoélectrique.

Ce fut l'une des deux conversions énergétiques nouvelles au XX^e siècle, il s'agit là d'une nouvelle conversion directe, énergie solaire > énergie électrique, mais pas d'une nouvelle énergie.

Panneaux solaires

Ils sont constitués de cellules photoélectriques au silicium, dénommées depuis 1960 photovoltaïques pour une raison inconnue, n'ayant aucun point commun avec la pile électrochimique de Volta. Elles débitent, suivant leur éclairage, un courant continu fonction de leur surface, sous une tension de 0,5 volt. Mises en série, elles constituent des panneaux à orienter face au soleil. Plusieurs technologies ont été développées pour améliorer leur rendement de 5% au début :

- Monocristallines, atteignant des rendements les plus élevés, 15 à 20% mais les plus chères
- Polycristallines, des rendements moindres de 10 à 13% et un prix acceptable, les plus utilisées
- Amorphes, un rendement inférieur à 10% avec un prix plus bas. Des progrès sont encore envisageables.

Ce rendement théorique, assez faible, est plus ou moins dégradé si le panneau n'est pas bien perpendiculaire aux rayons lumineux, en fonction du sinus de l'angle d'incidence.

La puissance électrique développée par un panneau, ensemble de cellules, va donc dépendre de ce rendement. Le soleil envoie sur terre une puissance théorique de 1,4 kW par m² ; on définit la puissance d'un panneau par celle qu'il délivre avec un ensoleillement de 1000 W/m². Un panneau de rendement 12% délivrera ainsi 120 watts crête par m².

Mais ce qui compte c'est l'énergie produite en kWh par jour ou par an, qui dépend de l'ensoleillement moyen du lieu, donc de la latitude, fonction aussi de la météo, car un simple nuage annule pratiquement la production d'un capteur solaire ; le rapport théorique jour-nuit est bien inférieur à 50 % en raison de l'éclairage réduit au lever et coucher du soleil. Un panneau produit valablement de l'électricité 3 heures avant et après le midi solaire, dans nos latitudes – quatre heures près des tropiques. Des cartes indiquent l'énergie produite dans le monde par un panneau solaire, par exemple 1300 kWh/m² par an à Paris.

Traduit en temps de fonctionnement, ou taux de charge un panneau installé à Paris débiterait théoriquement sa puissance nominale 14% du temps en moyenne annuelle, 21% à Marseille, 32% au Sahara, soit un maximum de 7,6 kW/h par m² et par 24h.

Ces chiffres sont théoriques, pour des panneaux solaires dirigés perpendiculairement au soleil. Il faut les réduire en fonction du sinus de l'angle formé par le plan du panneau et la droite qui le joint au soleil. Cet angle varie naturellement en fonction de l'heure et de la saison, sauf si les panneaux sont orientés automatiquement suivant la course du soleil. Solution onéreuse, adoptée par la première centrale EDF à concentration, Thémis (ci-après). Lorsque les panneaux sont installés sur toiture, cet angle est rarement optimum, soit à l'azimut moyen suivant l'heure et l'élévation moyenne suivant la saison. D'où un mauvais rendement du solaire photoélectrique. Les panneaux, généralement non orientables perpendiculairement au soleil, ne fournissent donc au mieux que 10 % de l'énergie annuelle que celle qui serait produite s'ils fonctionnaient 100 % du temps à leur puissance nominale.

Ce défaut dégrade fortement leur taux de charge (8), déjà très affecté par le nombre d'heures réduit où brille le soleil. RTE constate ainsi que ce taux de charge a été de 7 % en 2010 pour l'ensemble de la France, inférieur à celui d'Allemagne à 7,9%, pourtant moins ensoleillée.

L'énergie électrique solaire directe partage ainsi avec l'éolien l'incontournable handicap d'une production trop intermittente, avec cependant une prévision exacte en nuit/jour, mais aléatoire de jour avec les nuages, mais sans aucun de stockage efficace en quantité et durée, qui atténuerait ce défaut.

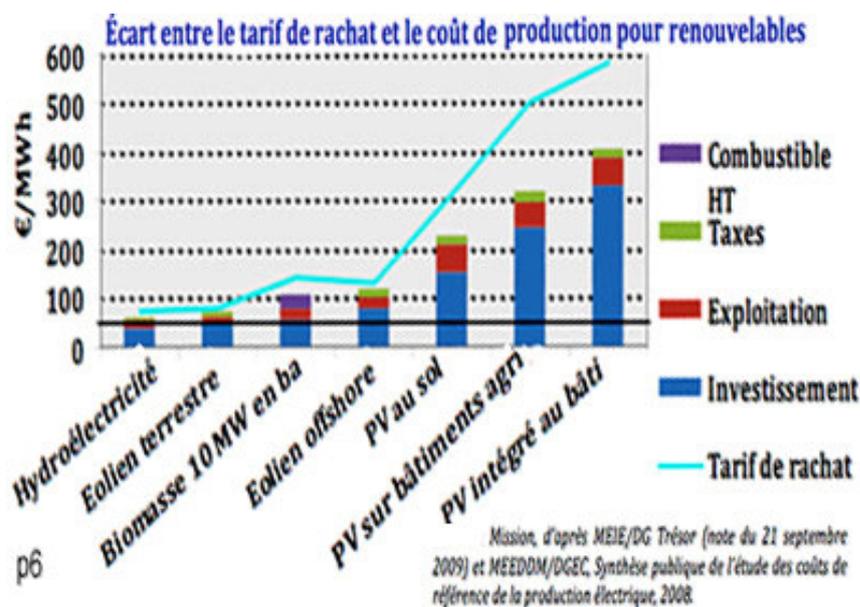
Une installation de 120 Wc par m², ayant 20% de pertes internes minimum, fournira théoriquement à Marseille 0,5 kWh/m² par jour, soit un taux de charge de 16% ; à Paris 0,3, soit 9,6 %.

Les prix baissent chaque année, mais à partir d'un très haut niveau.

En 2008, on peut estimer le coût d'une installation de 10 m² à 15 000 € par kWc.

Il faut prévoir un convertisseur de courant continu en alternatif, l'onduleur, et pour une petite installation domestique, on peut stocker pour la soirée une partie de l'énergie de jour, s'il fait beau, dans des accumulateurs avec un rendement charge-décharge de 70/80%. Mais c'est beaucoup plus rentable en France de revendre très cher cette énergie au distributeur, par l'Obligation d'achat, tout en lui rachetant cette électricité à bas prix pour son propre usage.

Dans les pays où la production d'électricité génère du CO₂, la revente au réseau par des particuliers de l'énergie électrique solaire qu'ils produisent a un fort succès en raison d'un prix de rachat très élevé.



L'obligation d'achat OA par le distributeur est exceptionnellement avantageuse pour le particulier qui installe des panneaux solaires sur ses toitures, en faisant payer la surprime reçue à l'ensemble des autres abonnés.

En France, il revend depuis 2006 au distributeur d'électricité les kWh solaires qu'il produit à 58 c€/kWh, et simultanément lui rachète pour sa propre consommation, ces mêmes kWh au prix normal de 10,7 c€/kWh.

Sa marge bénéficiaire instantanée est de 500 %, lui permettant d'amortir son installation en quelques années. Pour le distributeur qui paie les kWh en sortie de centrale environ 0,5 c€/kWh, l'OA l'oblige à racheter les kWh solaires 10 fois plus cher que ceux vendus sur les bourses au prix du marché, soit 1000 %.

Le système s'apparente à une escroquerie légale sur le dos des autres usagers ; il a ainsi provoqué un ruée sur ce pactole financier (p6).

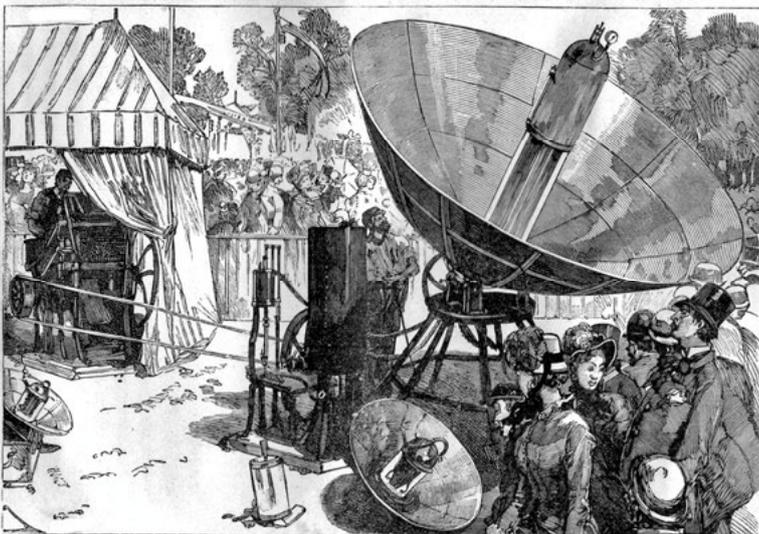
Dans plusieurs pays étrangers, l'abonné qui installe des panneaux solaires utilise les kWh produits pour sa propre consommation et ne revend cher, au réseau distributeur que le surplus, lorsque sa production solaire dépasse sa propre consommation. (14)

Un contrat plus logique et équitable vis à vis de la collectivité serait que le distributeur déduise simplement les kWh solaires réellement fournis au réseau, dépassant la propre consommation de l'abonné. Ce serait déjà équivalent à une prime d'environ 100%, le distributeur payant ainsi à l'abonné les kWh déjà 2 fois plus cher que le prix du marché libre. Mais les directives européennes pour la concurrence, électricité en premier, sont élastiques sous la pression des lobbys.

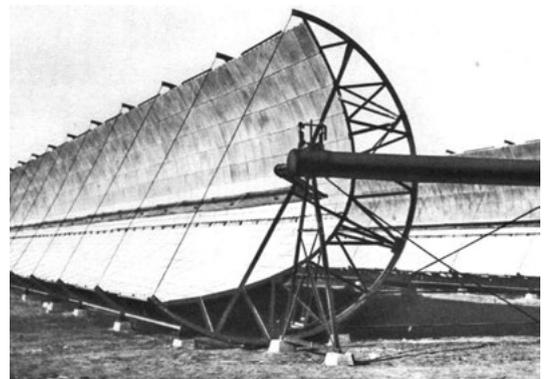
- Système solaire à concentration

L'énergie solaire ayant l'inconvénient d'être bien trop diffuse pour la transformer en électricité, on a cherché à concentrer optiquement sa source, la lumière du soleil pour la transformer en chaleur puis en énergie mécanique et finalement en électricité. En 1882, Augustin Mouchot, professeur de lycée et le constructeur Abel Pifre présentaient à Paris un système avec miroir parabolique concentrant le rayonnement sur une mini chaudière à son foyer ; la vapeur produite faisait tourner un moteur, lequel entraînait une machine d'imprimerie (q). Une autre application industrielle de ce principe était réalisée en 1912, à Meadi en Egypte, pour pomper l'eau d'irrigation.

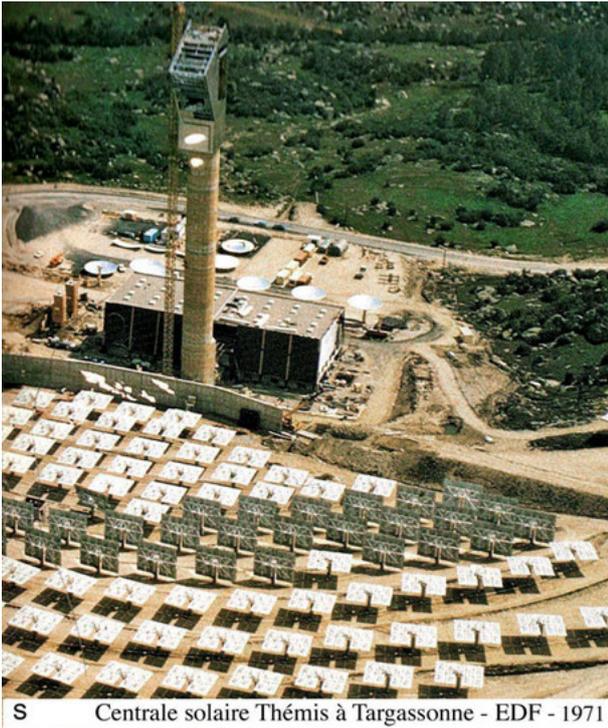
Ce système Shuman utilisait des miroirs cylindro-paraboliques pour concentrer la chaleur solaire sur un conduit où elle est vaporisée et transmise au moteur à vapeur (r). L'installation fonctionnait bien, malgré cela elle resta un cas isolé. Des projets sont en cours pour reprendre ce système de captage, mais utiliser la vapeur pour faire tourner des turbines et générateurs électriques avec un mauvais rendement thermodynamiques. Il vaut bien mieux faire marcher directement des moteurs à vapeur.



q Presse d'imprimerie animée par concentrateur solaire - système Mouchot et Pifre -1882



r Miroirs, moteur à vapeur, pompes à Meadi en Egypte-1912



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.

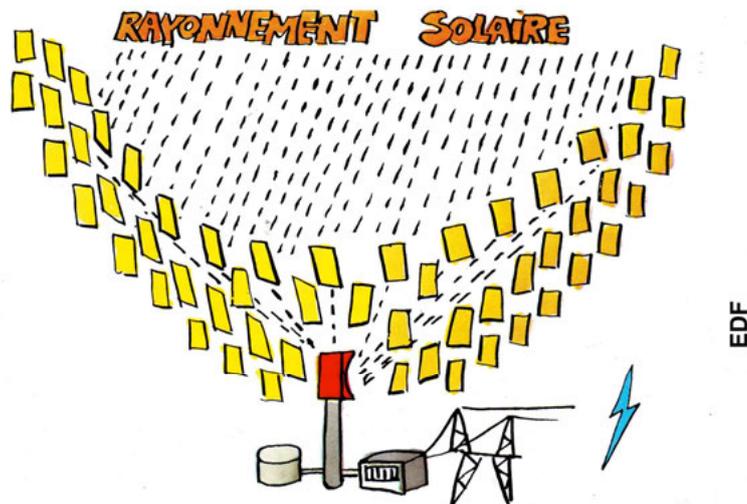
L'énergie solaire ne peut rester qu'un faible appoint de quelques % pour les réseaux nationaux. Il est significatif que les pays pétroliers du Golfe, pourtant riches et très ensoleillés, envisagent l'énergie nucléaire plutôt que le solaire pour relayer l'épuisement de leur pétrole dans quelques décennies.

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

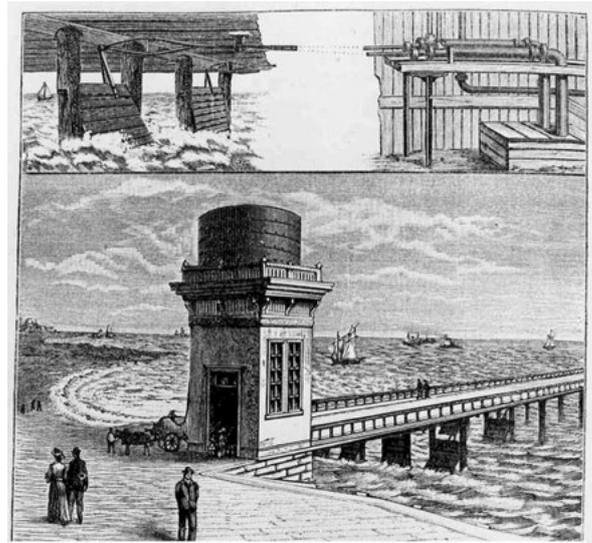
L'énergie des vagues est très impressionnante par sa puissance les jours de tempête, mais reste un objectif difficile. Sa transformation en électricité peut adopter plusieurs formes : Au XIX^e siècle une dizaine de systèmes ont été projetés ou réalisés, par exemple faire osciller des volets qui transmettaient 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.

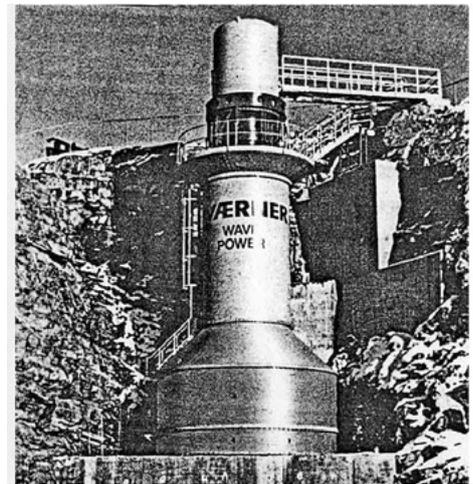
L'énergie des marées avait par contre été utilisée par des moulins de marée sur des côtes, comme celles de la Bretagne. Les estuaires des rivières forment là de longs réservoirs se remplissant et se vidant au rythme des marées.

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.

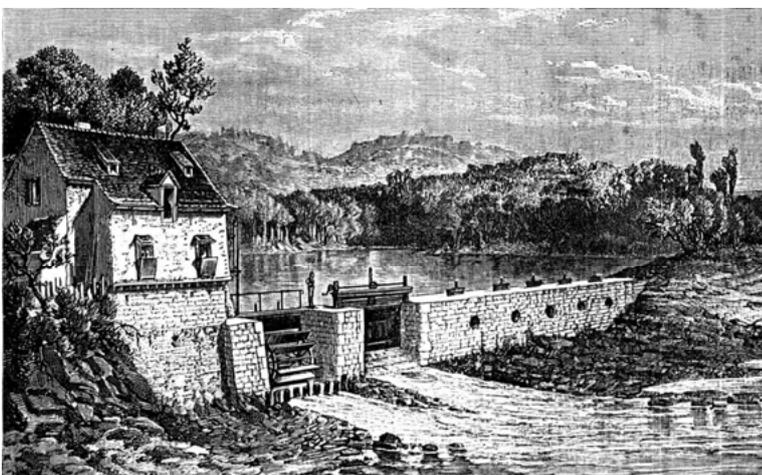
L'idée de remplacer l'ancien moulin de la Rance par un vaste système hydroélectrique remonte au début du XX^e siècle et l'usine marémotrice, première au monde, fut mise en service en 1966, apportant une puissance de 240 MW, seulement 25 % du temps, mais programmable. Ce projet nécessita l'invention d'un 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.

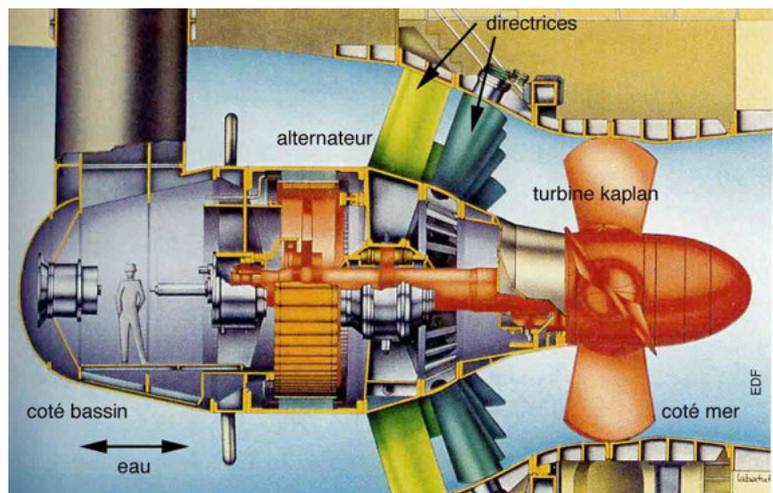
L'énergie des courants de marée

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.

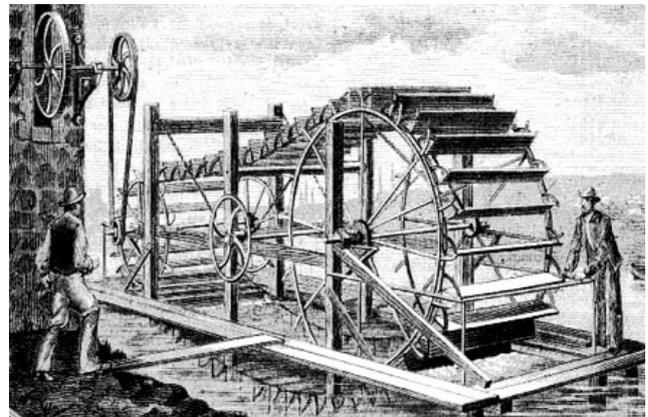


u

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.

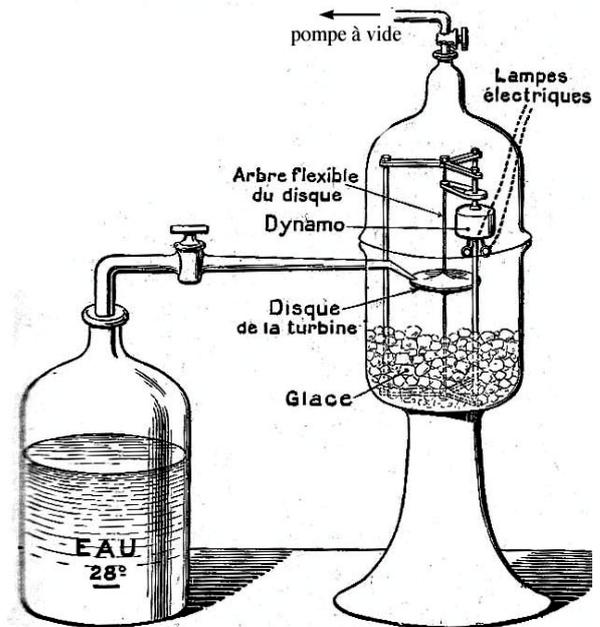
L'Énergie Thermique des Mers – ETM

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).

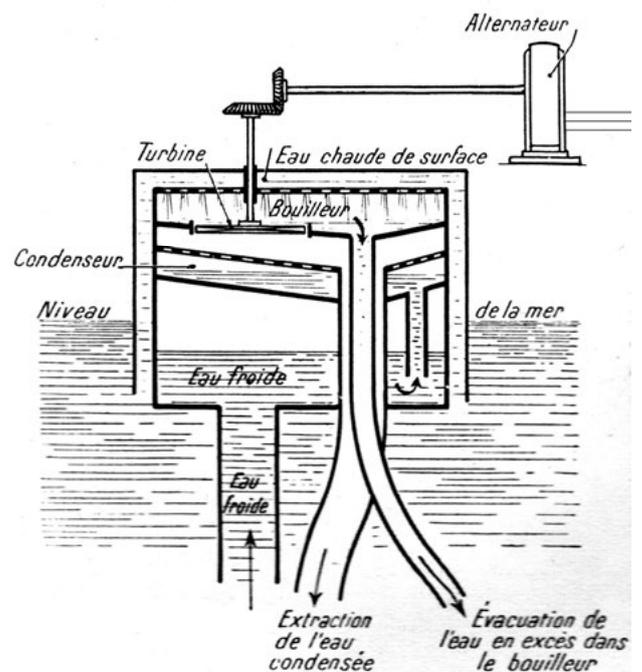
En 1926, deux ingénieurs français, Georges Claude, physicien, et Paul Boucherot, électricien, présentent à l'Académie un mémoire sur la possibilité de concevoir une usine à vapeur d'océan fournissant de l'énergie électrique à partir d'un moteur à vapeur fonctionnant classiquement avec le principe de 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.

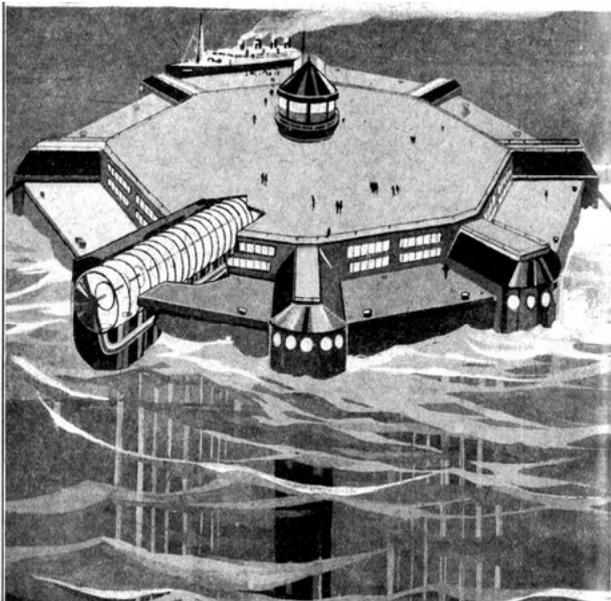


w Expérience de Claude et Boucherot - 1927



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.

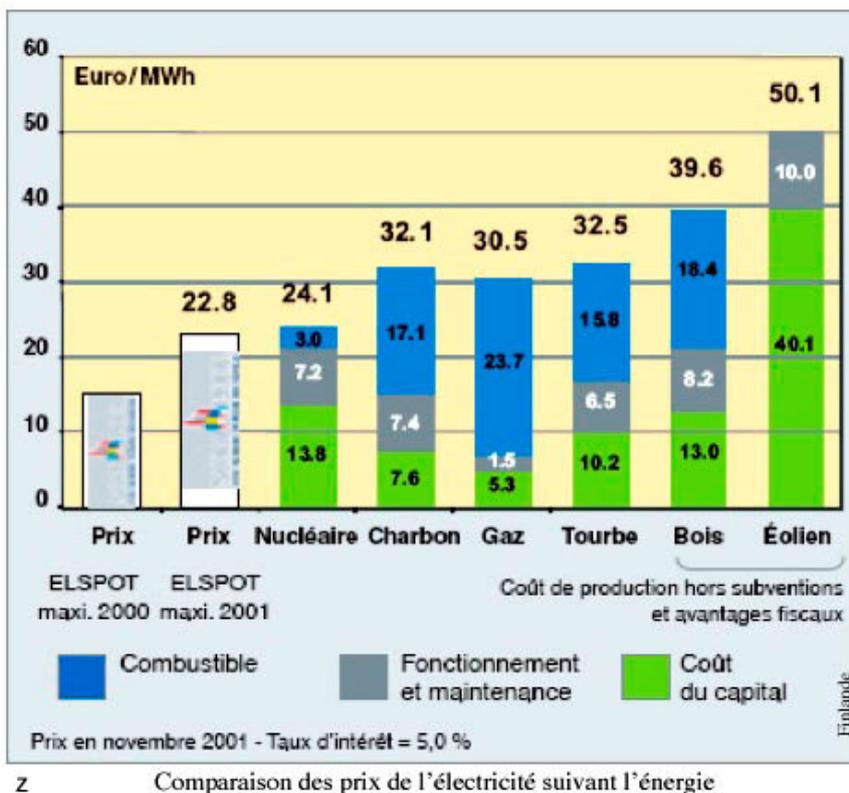
Son principe le limite aux mers tropicales, ce qui n'intéresse pas directement les pays du Nord, les plus capables techniquement et financièrement de le développer (16).

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.



Des chiffres valables seraient ceux d'une étude finlandaise de 2002 destinée à faire un choix entre différentes sources d'énergie pour une nouvelle centrale projetée. (z) La comparaison est faite aussi avec le prix du kWh acheté à la bourse scandinave ELSPOT. Les centrales nucléaires sont considérées fonctionner plus de 6000 h/an et le prix inclut la gestion des déchets et le démantèlement.

On notera pour chaque énergie, l'importance relative très variable du coût du combustible et du coût d'amortissement de l'investissement. Lorsque le coût de combustible est faible ou nul, le prix réel du kWh est d'autant plus faible que la centrale fonctionne pour une durée annuelle la plus longue, proche des 8760 h. À l'inverse, la turbine à gaz dont le prix du kWh dépend surtout du combustible est un moyen de production bien adapté pour couvrir les pointes plutôt que la base.

Pour les centrales hydrauliques au coût de combustible nul, non envisagées dans cette étude, le prix de revient moyen indiqué par EDF serait de 2,2 c€/MWh pour les puissances importantes, malgré l'investissement généralement élevé, mais amorti sur plus de 60 ans.

Nouvelles sources ou conversions d'énergie

Bien que les sources primaires, la matière puis le soleil, soient à peine exploitées directement, nombre de nos contemporains espèrent néanmoins que les scientifiques découvriront une nouvelle source d'énergie. Jules Verne propulsait le sous-marin Nautilus avec des piles au sodium dont regorge l'océan.

Albert Robida, prophète de *La vie électrique au vingtième siècle* présageait la circulation des véhicules aériens par des propulseurs mystérieux, fonctionnant semble-t-il avec l'antimatière (fin du chapitre). Spielberg propulse ses vaisseaux spatiaux avec l'énergie libre de l'éther intergalactique, révélée par Tesla.

Cette croyance naïve que le progrès des sciences exactes et des techniques peut se prolonger indéfiniment est fortement enracinée. Même les arbres ne montent pas jusqu'au ciel dit-on. Méditons à ce sujet une leçon de l'histoire : plus les recherches sont entreprises depuis longtemps, 120 ans en ce cas, et ont mobilisé beaucoup de monde, plus la probabilité de trouver une solution acceptable s'amenuise.

En pratique, on estime un coût moyen annuel. Pour les centrales nucléaires françaises le coût moyen en 2010, serait de 0,35 c€/kWh, provision pour démolition à 40 ans comprise. En Amérique où le nucléaire est concurrencé par le charbon, il n'est rentable qu'au-dessus de 5000 h par an.

S'ajoute le coût de transport, pertes de 2 à 3% et investissement pour les lignes HT, 5 fois plus élevé si elles sont enterrées. Et finalement les coûts de distribution, pertes de 3%, investissements et entretien onéreux des lignes de livraison aux abonnés.

Pour les coûts de production, les sources sont nombreuses mais souvent d'une objectivité incertaine.

En fait, ce n'est pas vraiment une autre source que les utopistes espèrent, mais une nouvelle conversion d'une énergie connue en une autre utilisable. Le principe de la conservation de l'énergie se résume toujours, jusqu'à preuve du contraire à :

On ne peut ni créer, ni détruire de l'énergie, uniquement la transformer.

Toutes les conversions envisageables ont été essayées et la plupart appliquées.

Au XX^e siècle, seules deux conversions nouvelles ont été découvertes et appliquées :

- la conversion en chaleur puis en électricité de l'énergie de la matière, par la fission nucléaire de métaux lourds, depuis 1965, mais ses inconvénients font peur ;
- la conversion directe du rayonnement solaire en électricité par les nouveaux semi-conducteurs au silicium, depuis 1970, mais le soleil n'éclaire au zénith que 2 heures et au total guère plus de 4 à 6 h sur 24.

La première de ces conversions a permis, en 2010, de produire 13 % de l'électricité mondiale, la seconde en a produit 0,2 %, grevée par son intermittence, sa nature diffuse difficile à concentrer, accentuant son coût d'investissement très élevé.

Il apparaît très improbable, faute de piste de recherche, dans le cadre de nos connaissances physiques actuelles, que l'on découvre encore une nouvelle conversion d'une énergie en une autre plus utilisable. Et même aurait-on une piste, l'histoire montre que l'on trouve rarement ce que l'on cherche, mais autre chose.

Quant à faire une nouvelle découverte importante en physique fondamentale, il ne naît pas un Newton ou Einstein tous les siècles.

Certes, le web héberge les fantasmes les plus divers :

– Tesla, l'homme des idées de génie, avait déclaré en 1891 que l'univers regorgeait d'une énergie libre cachée dans l'éther ou baigne tout l'univers, qu'il tenta de transmettre au bout de la terre (16). Les scientifiques semblent encore l'ignorer, la matière noire ? et les bricoleurs astucieux du concours Lépine ne l'ont pas encore apprivoisée.

– Le moteur à eau ou à air réapparaît régulièrement depuis un demi-siècle. Des compagnies pétrolières auraient racheté au génial inventeur son brevet, caché dans un coffre secret, pour empêcher son exploitation révolutionnaire qui les ruinerait.

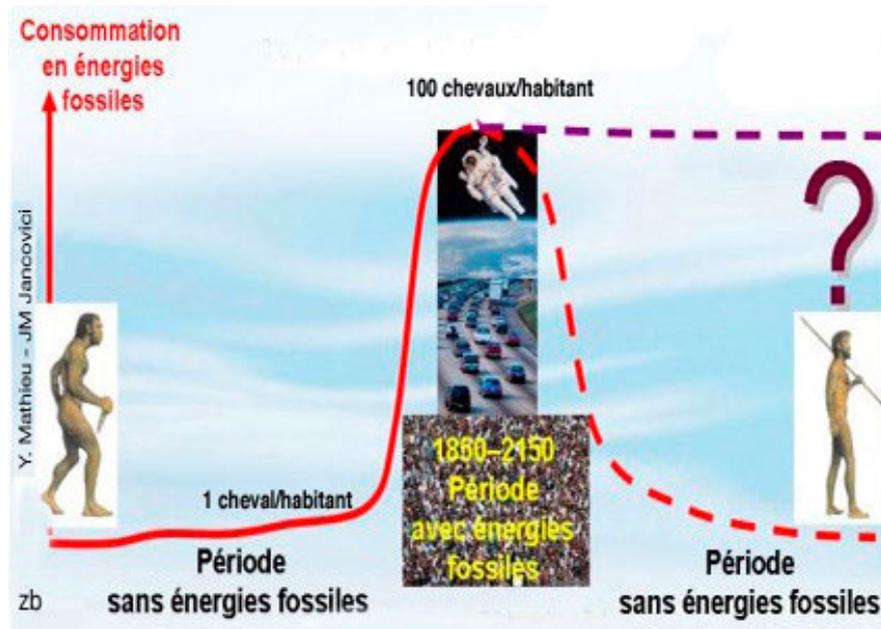
– En 1970, un savant d'une université américaine faisait tourner un moteur avec l'énergie du champ magnétique de la terre, mais on ignore s'il soulevait plus d'un gramme.

Ce qui paraît certain par contre, c'est qu'avec l'épuisement des combustibles fossiles, pétrole et gaz, dans la seconde moitié du XXI^e siècle, l'humanité devra se partager une très petite partie du travail des 100 chevaux dont chacun des 6 milliards d'humains dispose encore aujourd'hui, pas du tout à égalité.

Production mondiale d'électricité - chiffres

En 2010, le monde a produit 21 200 TWh (Térawatt/heure = milliard de kWh), en accroissement annuel moyen de 3,2% depuis 10 ans, tenant compte d'une baisse de 1,1% en 2009, conséquence de la crise économique.

Les principaux producteurs étaient : Etats-Unis, 4300 TWh – Chine, 4200 – Japon, 1080 – Russie, 990 – Inde, 920 – Canada, 620 – Allemagne, 620 – France, 570 – Brésil, 460 – Corée du Sud, 450 – Royaume uni, 370 – Espagne, 300 – Italie, 300...



Compléments

Les chiffres sont issus de sites web fiables : Wikipedia, RTE, EDF et principalement de l'Observatoire des énergies renouvelables :

energies-renouvelables.org/ > observ'ER > l'électricité renouvelable dans le monde

1 - Nota

- Sur ce sujet sensible en 2010, le lecteur voudra bien ne pas me classer avec la simpliste dichotomie médiatique en pro-nucléaire, opposé aux anti-nucléaires, mais entre ces deux clans politico-idéologiques : dans la minorité silencieuse professionnellement compétente, informée et non-suicidaire, consciente que :

Le nucléaire, on ne pourra malheureusement pas s'en passer, il faut faire avec, donc le perfectionner par paliers dans de nouvelles filières, pour limiter ses inconvénients et risques élevés, tout en bénéficiant de ses avantages notables surtout la surgénération (renouvelable) et l'absence de CO2.

Ceci tant que les utopistes n'auront pas trouvé d'autre solution pour remplacer par X, d'abord les 67,2% d'électricité d'origine fossile, puis les 13% d'origine nucléaire, produits dans le monde en 2010. Les solutions X proposées après 12 ans de développement intensif dans plusieurs pays, sont 1,6 % d'éolien et 0,2% de solaire, énergies intermittentes à trop faible disponibilité et non stockables, plus 1,2 % de biomasse, limitée en quantité.

Quoi d'autre, l'hydraulique étant presque épuisée ? On propose d'abord d'inverser la croissance de consommation de plus 1,5 %/an, en moins 20 %. Comment ? Et après, pour le restant ?

2 - Rendement de Carnot

Ce rendement a été explicité au chapitre I-6. Corrigeons cependant un peu cette déprimante fatalité, que notre électricité d'origine thermique ne transforme que moins de la moitié de la chaleur



zc Les médias : anecdotiques et spectaculaires.

nécessaire à sa production, par la « malédiction » du principe de Carnot ». N'oublions pas la réversibilité de ce phénomène thermodynamique, l'énergie mécanique d'un compresseur actionné à l'électricité peut transférer de la chaleur d'une source à une autre, par exemple extraire la chaleur intérieure de notre réfrigérateur (refroidissement) pour la rejeter à l'extérieur dans la cuisine. De même la chaleur interne de notre maison pour la rejeter à l'extérieur même plus chaud (climatisation). Mais surtout, le même compresseur, dénommé alors pompe à chaleur, peut inversement extraire la chaleur extérieure de l'air, l'eau ou du sol, même froids, (en les refroidissant plus) pour la dissiper dans la maison l'hiver (chauffage).

Dans ce dernier cas, le rendement Carnot s'applique, mais à l'envers, l'énergie electro-mécanique dépensée par le compresseur se transforme alors avec une amplification de 2 à 3 fois en énergie thermique transférée de l'extérieur à l'intérieur de la maison. Un kW électrique consommé par le compresseur, restitue au moins deux kW de chaleur. La malédiction thermique du théorème de Carnot est inversée : le rendement $1/3$ à $1/2$ de la conversion, chaleur > énergie mécanique > électricité à la centrale est compensée par le rendement de 2 à 3, électricité > énergie mécanique > chaleur au compresseur de la pompe à chaleur.

Le chauffage électrique par pompe à chaleur a ainsi une très bonne efficacité énergétique, exprimée par son COP, coefficient de performance de 2 à 3, parfois annoncé à 4, et se trouve de plus écologique s'il utilise de l'électricité de base d'origine thermique produite sans CO₂.

Le COP est d'autant plus élevé que la différence de température entre les sources chaude et froide est réduite.

3 - Pétrole en 2060

Songez à l'opinion qu'auront de nous nos petits-enfants sur notre inconséquence, lorsqu'ils se battront pour les dernières gouttes de pétrole vers 2050 ou 60, d'avoir brûlé dans nos chaudières domestiques ou de centrales ce précieux liquide, presque seul, en quantité suffisante, capable de faire marcher les transports terrestres autonomes, maritimes et surtout aériens. Bien sûr, on peut fabriquer de l'essence avec des plantes, en petite quantité, mieux avec le charbon liquéfié. Tel l'ancien procédé allemand Bergius-Fischer de 1925 d'hydrogénation du carbone, l'Allemagne, sans ressources pétrolières pour ses chars et avions, l'a cependant bien exploité pendant WW2.

Mais au XXI^e siècle, le charbon s'épuisera aussi.

Pour simplement se chauffer, d'autres sources intermédiaires plus ou moins développées existent ou sont possibles. Pour quelques décennies ce sera le gaz.

Pour toutes les matières plastiques actuellement issues du pétrole, le charbon le remplacera pendant un siècle. Après, la biomasse ?

L'avenir énergétique n'est pas réjouissant pour la seconde moitié du siècle et surtout le suivant.

Le pétrole s'est trouvé le plus approprié pour fournir l'énergie mécanique aux moyens de transport terrestres autonomes, puis aériens et maritimes. Mais les moteurs, dits thermiques, subissent eux aussi la malédiction du théorème de Carnot pour la deuxième phase de la conversion de l'énergie chimique de combustion du pétrole avec l'oxygène > énergie thermique > énergie mécanique. Leur rendement est de 15 à 30% suivant machines et puissances. Le reste de l'énergie n'est pas récupérable, sauf l'hiver pour chauffer le véhicule.

4 - La **production de CO₂** par les différentes sources d'énergie thermique est variable suivant la quantité de carbone et d'hydrogène constituant leur molécule.

La combustion avec l'oxygène du charbon produit essentiellement du CO₂. Les hydrocarbures, pétrole et gaz produisent un rapport variable de CO₂ et de H₂O, suivant leur teneur respective en carbone et hydrogène. On peut résumer approximativement que, pour produire la même quantité de chaleur, le charbon produit 10 de CO₂, le pétrole 8, le gaz 6. Inversement les hydrocarbures produisent plus d'eau.

5 - Catastrophes nucléaires

Le résumé ci-dessus est réduit au minimum. De nombreux sites web plus ou moins fiables relatent les causes et déroulement des accidents. Il est cependant préférable de se reporter aux sites les plus fiables, par exemple l'irsn.fr ou Wikipédia :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucléaire_de_Three_Mile_Island

fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_nucléaire_de_Tchernobyl

http://fr.wikipedia.org/wiki/Accident_nucléaire_de_Fukushima

La plupart des articles et films présentés à l'occasion du 20^e anniversaire de Tchernobyl traitent des conséquences dans la ligne du catastrophisme médiatique. Très peu traitent des causes et du déroulement de l'accident, permettant d'en tirer des leçons pour l'avenir, autre que le simpliste « sortir du nucléaire ». Cependant, un film BBC de 2007 a été programmé une fois sur FR5 est le seul à analyser l'accident. Basé sur les témoignages des rescapés de la centrale, surtout d'archives ou de collègues de Valeri Legasov. Ce secrétaire du Politburo était un scientifique qui a conseillé les dirigeants après l'accident et les 2 années suivantes puis dirigé l'enquête. Il a été chargé d'expliquer l'accident en 1988 au Congrès de Vienne de l'AIEA en faussant la vérité, accusant les erreurs des opérateurs de la centrale, pour masquer la responsabilité principale celle du système soviétique et son dieu, le secret. Peu après, il a été retrouvé pendu chez lui.

Après Tchernobyl, l'URSS en dissolution a sanctionné : Le directeur de la centrale, Bryukanov qui dormait chez lui à Pripriat, et son adjoint, Dyatlov qui a exécuté l'essai ordonné par le ministère de la défense, contre l'avis des agents locaux en service, ont été emprisonnés à vie en Sibérie. Libérés dix ans plus tard, vu leur état de santé, ils sont décédés peu après. Le Président Gorbatchev a ensuite été éliminé politiquement.

Après Fukushima, la responsabilité de ne pas avoir construit un simple mur de protection de 5 m était à la charge de la TEPCO, constructeur et exploitant, partagée avec l'Agence de sûreté japonaise et le gouvernement. Le Japon a dérogé à son ancienne règle d'honneur du hara-kiri. Pas un suicide n'a été signalé, comme en URSS.

6 - Le Forum international Génération IV, initié par le département de l'énergie USA, a classé différentes filières possibles pour l'exploitation ultérieure éventuelle de l'énergie de fission atomique :

- Génération I, les filières du début, années 1945-1965 : graphite-gaz et autres, abandonnées.
- Génération II, filières actuellement en exploitation PWR – BWR – CANDU- RBMK
- Génération III EPR d'AREVA –AP600 de Toshiba –ABWR, filières avec perfectionnements de la génération II

- Génération IV- six filières nouvelles à étudier et valider (15 à 20 ans) suivant cinq critères : Prix réduit d'investissement et de fonctionnement - Sûreté accrue – Déchets minimum – résistance à la prolifération – Optimisation des ressources en combustible.

Les savoir-faire seraient mis ensuite en commun pour l'industrialisation répartie dans différents pays.

7 - Le nucléaire est typique des rares systèmes à très haute sécurité et très faible probabilité d'accident. Les spécialistes de sûreté en ont analysé en particulier les paradoxes : Le paradoxe de perception collective : plus l'accident est rare, plus il apparaît anormal et insupportable et la concentration des victimes potentielles l'augmente.

Sa charge symbolique est considérablement accrue. Personne ne songe à interdire la voiture qui tue 1 300 000 humains par an, à 90% dans les pays développés, mais pas en une seule catastrophe, ni au même endroit

8 - Le taux de disponibilité d'un moyen de production d'électricité est le rapport du nombre d'heures où il est prêt à fonctionner et le total d'heures annuelles (8760).

Le **facteur ou taux de charge C** en % est le rapport entre le nombre E total de kWh qu'il produit par an et le nombre de kWh qu'il aurait produit s'il fonctionnait à sa puissance nominale P en permanence pendant un an.

$$C = E / P \times 8760 \times 100$$

Inférieur au taux de disponibilité, il ne peut que l'égaliser au mieux. Il représente la rentabilité énergétique de l'investissement

Ex : une centrale thermique fossile ou nucléaire a un taux de disponibilité de 85 à 90 %. Son taux de charge peut atteindre cette valeur en hiver, il est plus faible annuellement, 60 à 70%.

Pour l'éolienne, le taux de disponibilité, c'est-à-dire le vent, est en moyenne de 25 % (2200h). Le taux ou facteur de charge atteint en 2010, 19,3% en France, 15,3% en Allemagne, 24,2% en Espagne.

Pour le solaire, c'est un peu plus complexe, le taux de disponibilité doit tenir compte du rapport nuit/jour 50%, ensuite de l'heure car un panneau ne fournit sa puissance nominale que lorsqu'il est orienté perpendiculaire au soleil, puis la puissance décroît avec l'angle d'orientation, fonction de l'heure. On estime que la production solaire est effective 3 à 4 h avant et après le midi solaire, soit 6 à 8 h. Elle s'annule presque par la présence variable de nuages.

Le taux de charge est plus facile à obtenir avec la formule ci-dessus, il est de 7,9 % en Allemagne, 7% en France, 18,9 en Espagne, théoriquement 32% maxi en Afrique saharienne.

9 - Ce plafond théorique de 15% d'éolien pourrait atteindre 20%, mais pour des réseaux de petite puissance pouvant faire appel rapidement à de l'importation de pays voisins, ou leur revendant, mais à prix bradé, leur surplus quand il y a du vent en période creuse. C'est le cas actuel du Danemark, suréquipé en éoliennes, qui achète en l'absence de vent, de l'électricité hydraulique de Norvège, nucléaire de Suède et charbon d'Allemagne, et leur revend de l'éolien à prix bradé lorsqu'il en a trop. Il pourrait certes, comme les autres producteurs, arrêter ses éoliennes temporairement inutiles, mais perdrait le revenu élevé que le gérant du réseau lui verse. Le consommateur danois paie alors son électricité 0,24 €/kWh, plus du double que le français.

10 - RTE –dossier de presse 30/11/2009 p.10, disponible sur rte-france.com

11- Pourtant l'éolien est promu aussi en France, pour des considérations probablement politiques et financières, sous couvert d'écologie. L'expert en énergie J.M. Jancovici démontre que pour la France, l'argent investi, transféré sur l'isolation des bâtiments économiserait beaucoup plus d'électricité que n'en produisent des éoliennes (manicore.com)

Les opposants à l'éolien en France, ajoutent à son inutilité et ses handicaps techniques des arguments : la pollution visuelle du paysage, sonore pour les voisins - la spéculation financière que l'obligation d'achat de kWh à un niveau exagéré a déclenché, assurant une rentabilité du capital de 10% à 15% pour les promoteurs du lobby éolien.

12 - Le stockage direct d'électricité en courant continu d'une puissance importante serait possible dans une grande inductance enterrée, mais pour être économiquement acceptable, elle devrait utiliser un nouveau matériau supraconducteur à découvrir, recherché depuis un siècle. Voir II-1, essai de BPA aux USA en 1984.

13 - The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909016759>

14 - Comme dans d'autres pays, en France, le distributeur d'électricité a une **obligation d'achat** aux particuliers des kWh de leur installation solaire en toiture au prix élevé de 58 c€/kWh, ou 35 c€ si l'installation est au sol, non intégrée au bâtiment.

Le distributeur les revend 10,7 €/kWh (8 c€/kWh, plus 27% de taxes) alors qu'il les achète normalement au producteur, à la sortie de la centrale, entre 3,5 et 5 c€/kWh suivant l'énergie primaire utilisée, nucléaire ou gaz.

Le distributeur répercute ce surcoût d'achat de ses kWh, atteignant jusqu'à 16 fois, à l'ensemble des usagers en l'intégrant dans la taxe CSPE, appliquée sur le kWh normal, 5% en 2009, mais cette taxe couvrant aussi le surcoût de l'éolien va rapidement croître.

15 - Jules Verne avait bien écrit dans *Vingt mille lieues sous les mers* que l'énergie pouvait être produite par la différence de température entre les eaux profondes et celles de surface de l'océan, mais son procédé était la thermoélectricité de Seebeck (II-2) dont on savait que son rendement était très, très faible, même à très grande échelle, ce n'était pas le principe thermodynamique de Carnot exploité par Claude.

Tous les écrivains, auteurs de BD ou cinéastes de science-fiction, trouvent les solutions techniques imaginaires qu'ils décrivent en consultant les scientifiques sur les limites techniques et économiques des procédés connus ou envisageables à une époque donnée, puis en les extrapolant bien au-delà du possible actuel.

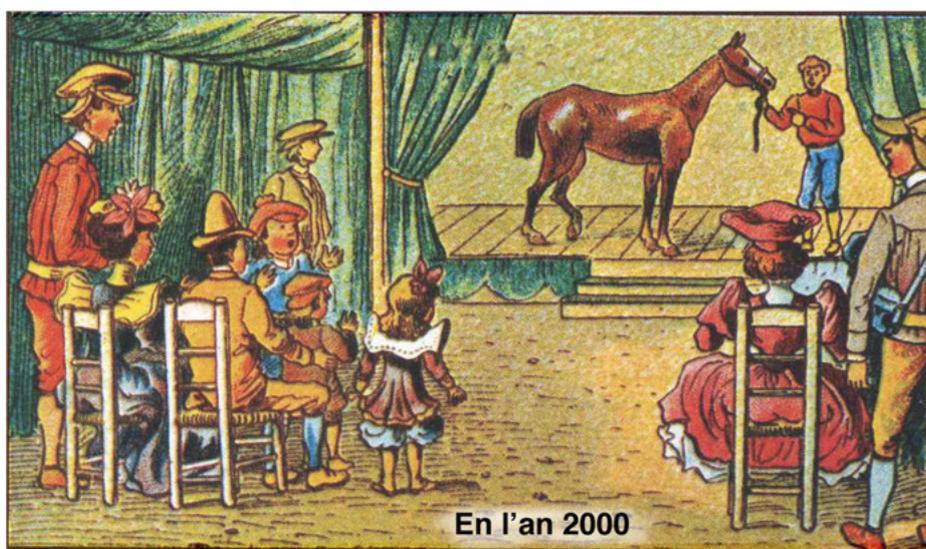
16 - Les mers tropicales, sources inépuisables d'énergie – Science et vie 02/1927

17 - L'énergie libre de Tesla est commentée dans des dizaines de sites internet, par exemple : magnetosynergie.com > la quête de l'énergie libre - ou encore scientox.net > Nicolas Tesla ? Rencontre d'un génie inconnu !

Quand on aura identifié où elle se trouve précisément, il faudra inventer un convertisseur pour la rendre utilisable en électricité ou bien en un produit pour faire tourner des moteurs ; ceci sans faire sauter l'ordonnancement actuel du système solaire et de la galaxie. On ne peut pas la puiser dans un immense réservoir invisible comme la matière noire, sans qu'elle soit remplacée par une autre énergie, sinon il faudra revoir le principe de la conservation de l'énergie qui serait erroné et fait néanmoins fonctionner l'Univers depuis 14 giga-années.

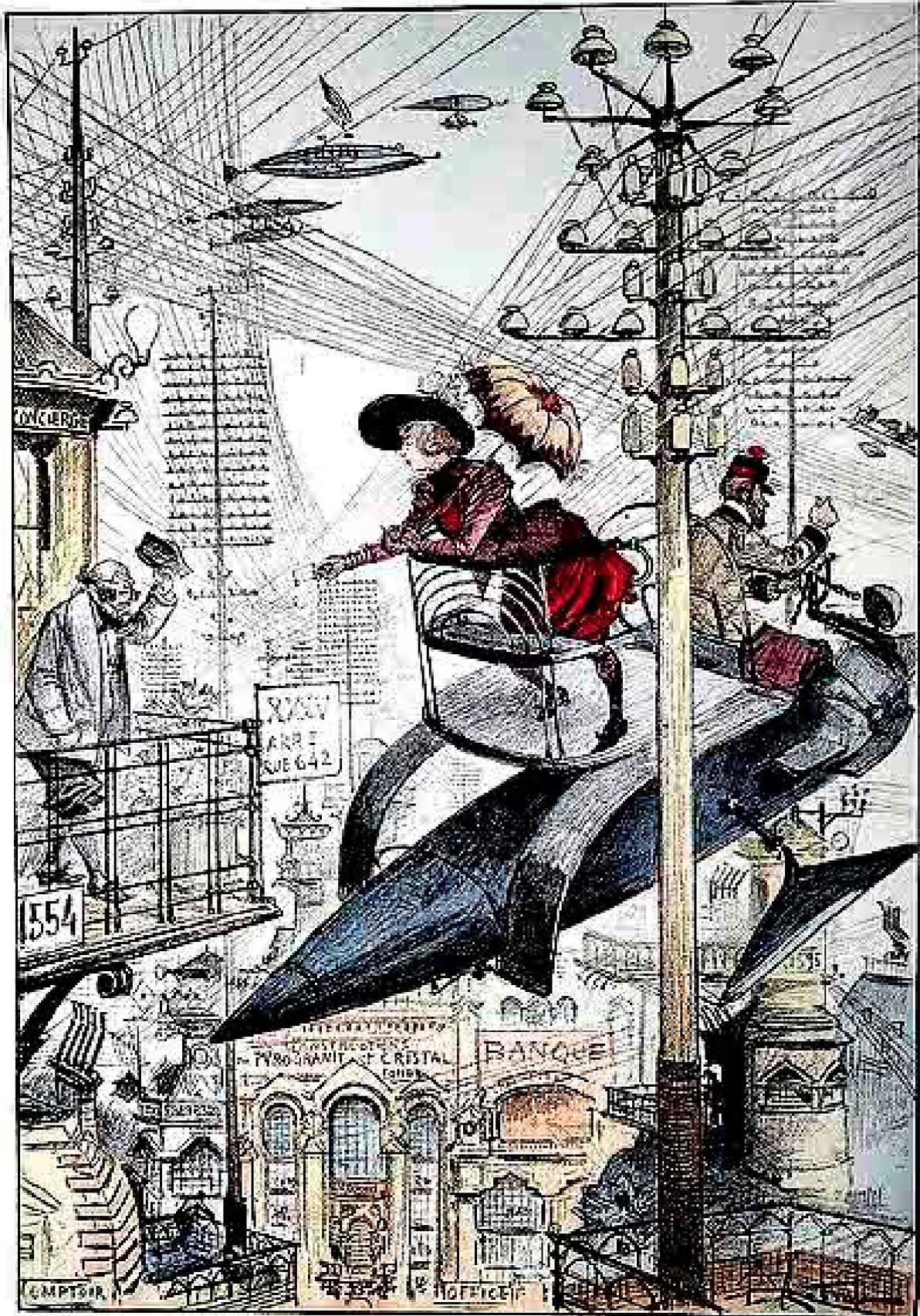
Il reste à quelques-uns le rêve de l'énergie libre, tant que Gaïa, déesse de la terre, nous donne ses dernières réserves de pétrole, gaz et charbon. Après il faudra redescendre dans les réalités, sur terre.

On sait que toutes les civilisations ont eu une fin, mais pour notre civilisation industrielle, apparue au début du XIX^e, basée sur l'énergie (100 chevaux par habitants), les découvertes des savants nous feraient échapper à cette malédiction, inscrite dans l'histoire de l'humanité et celle des religions.



En l'an 2000

Une Curiosité

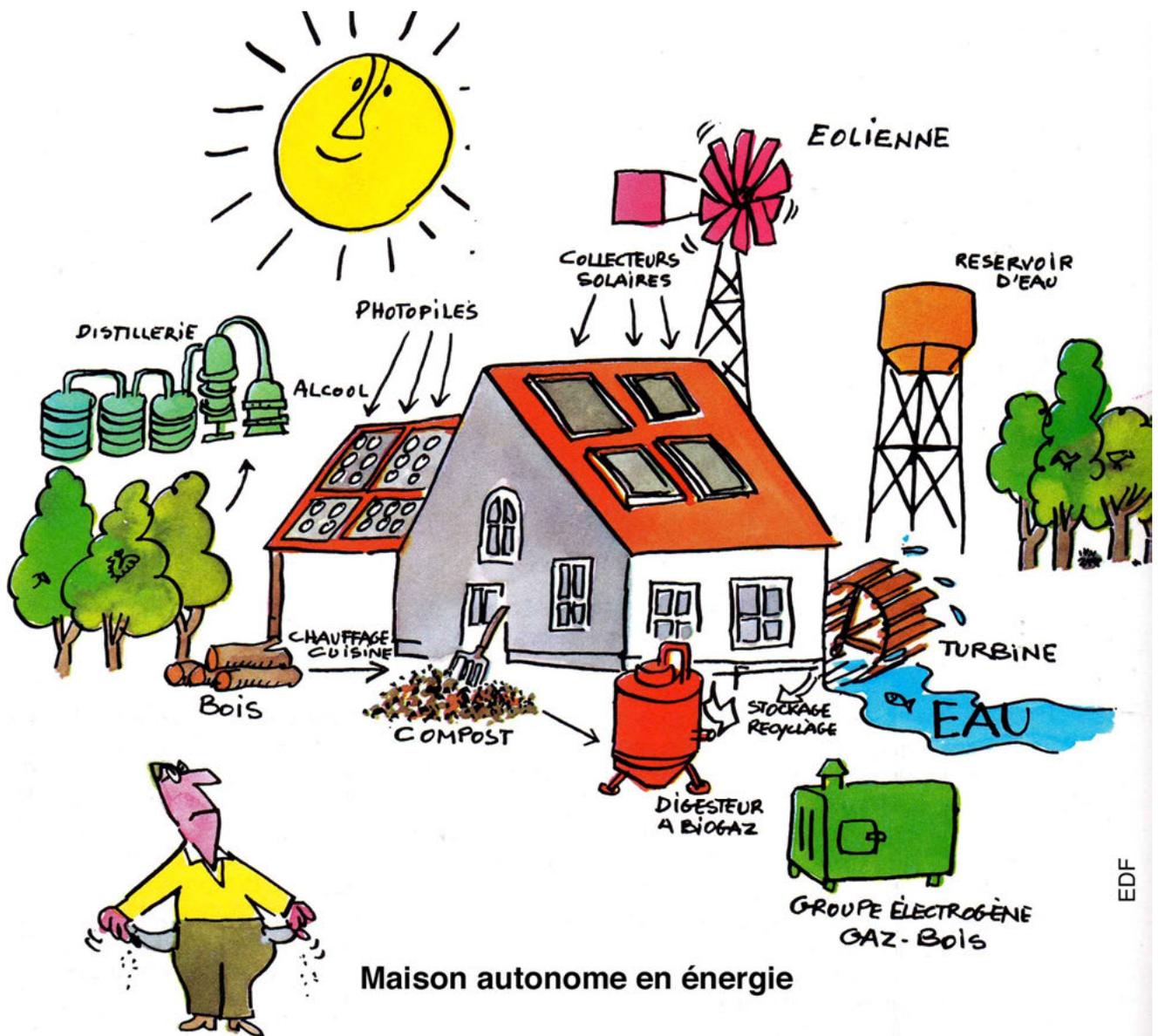


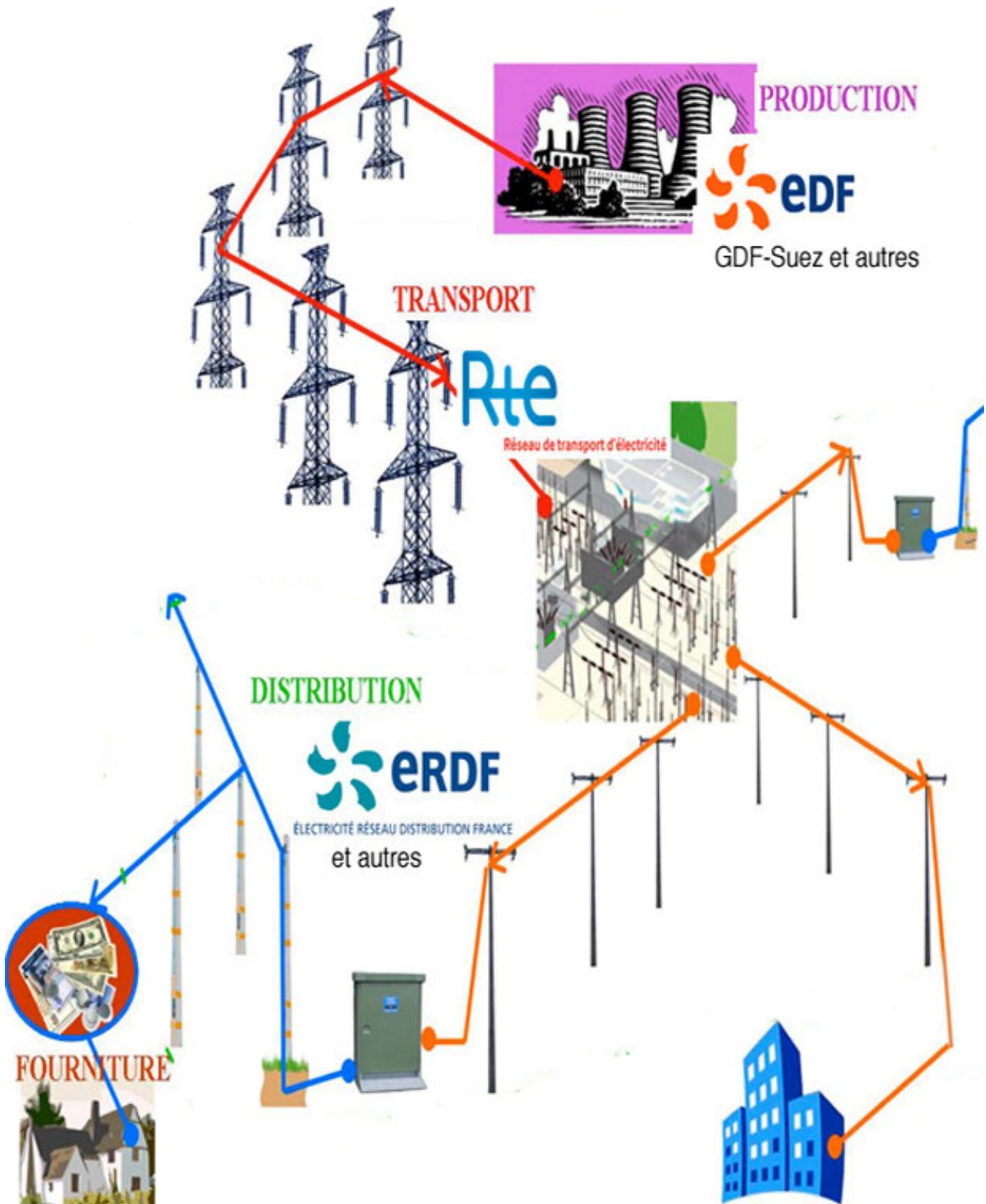
za

UN QUARTIER ENBROUILLÉ.

Le vingtième siècle - Albert Robida - 1883

A la fin du vingt et unième siècle





6 – Sources d'énergie électrique en France

Bref historique

Cet historique, un peu en marge du thème du livre, est complémentaire du chapitre précédent. Il illustre la difficulté des choix énergétiques dans un cas particulier, celui de la France.

De 1890 à 1945

L'énergie électrique en forte croissance continue comme tous les pays, était alors générée en France à partir du charbon pour moitié, à partir de l'hydraulique pour l'autre moitié.

L'électrification progressait à partir de petits réseaux locaux, 7000 communes étaient électrifiées en 1920, la presque totalité, 36000, en 1938. Des petites interconnexions régionales de ces réseaux s'organisaient progressivement.

Après 1945

Les grands secteurs d'intérêt économique et stratégique avaient été nationalisés après la guerre. L'EDF a été constituée en 1946 par le rachat de 28 sociétés de production, distribution d'électricité et producteurs autonomes. Son monopole concernait la production de l'énergie au-delà de 8 MW, le transport et la distribution de l'électricité, sauf plusieurs régies appartenant à des collectivités locales (Strasbourg, Grenoble). Elles ont continué à distribuer l'électricité qu'elles produisaient ou achetaient à EDF.

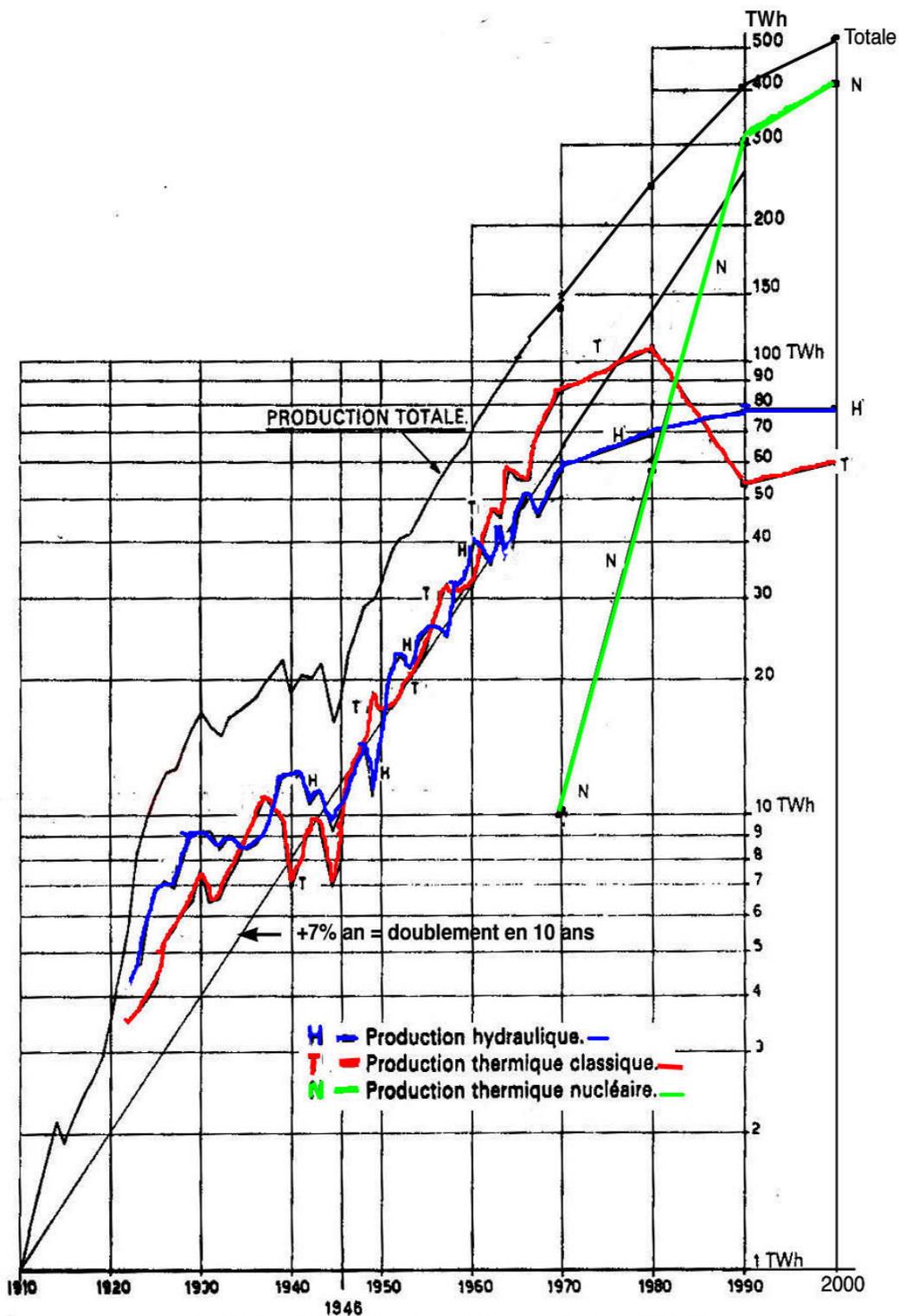
Subsistèrent aussi les centrales thermiques des Houillères et la C.N.R. Cie Nationale du Rhône, pour les grands barrages sur le Rhône, dont le premier, Génissiat, était en cours depuis 1938.

Dès 1946 le problème fut d'abord d'organiser équitablement les coupures de courant, la production étant très insuffisante, rien n'ayant été construit et beaucoup démolit pendant quatre ans. Puis il fallut standardiser progressivement les moyennes tensions pour réduire le trop grand nombre de matériels différents. Plus tard, en 1966, la basse tension 110-120 volts fut remplacée par le 220 volts.

Les moyens de production augmentaient mais avec peine pour suivre la consommation qui allait s'accroître pendant des décennies de 7% par an, soit le doublement tous les 10 ans. De 35 TWh en 1950 la consommation passait à 200 TWh en 1973.

L'effort fut porté sur les deux énergies les plus rentables et disponibles à l'époque : l'énergie thermique du charbon des mines du Nord, de l'Est et du Massif central, l'énergie hydraulique des torrents de montagnes et des fleuves. Après la première centrale EDF de Péage de Vizille sur la Romanche en 1949, tous les sites hydrauliques valables furent progressivement équipés jusqu'en 1980. Ce fut une grande aventure réussie, sans oublier que ces travaux dangereux avaient entraîné des morts à chaque barrage.

L'évolution de 1910 à 2000 de la production totale, thermique et hydraulique, est graphiquée à la page suivante (a). Le taux d'accroissement depuis 2000 est de 1 à 1,5% par an, avec un creux profond en 2009.



a

Évolution de la production totale française depuis 1900.

D'autres sources d'énergie naturelle.

Une étude prospective d'autres sources d'énergie capables de se transformer en énergie mécanique, puis électrique, fut entreprise après 1945 par le centre d'Etudes et Recherches EDF des Renardières.

On savait que le **charbon** était limité en quantité et trop cher en France ; l'**hydraulique** allait aussi arriver à son maximum après recensement de tous les sites restant à équiper à des prix acceptables.

- Une prospection complète de tous les sites favorables pour l'**énergie éolienne** fut effectuée (cartes des forces, fréquences et direction du vent), avec l'essai de prototype (b) en 1960. Le système ne fut pas adopté essentiellement en raison du taux de disponibilité de 20 % bien trop faible, avec en plus l'incertitude de la météo, la trop grande dispersion des nombreux sites à raccorder et le contrôle des moyens de commande. Ce cumul d'inconvénients a été considéré à l'époque comme rédhibitoire pour une énergie de base. Sans que ces problèmes aient été éliminés, l'éolienne serait-elle aujourd'hui capable d'être plus qu'une énergie complémentaire ?



b Éolienne EDF 1960

- L'**énergie des vagues** ne fut pas explorée, les difficultés dues aux tempêtes subies par beaucoup d'expériences anciennes restant un obstacle majeur.

- Par contre, l'**énergie des marées** reçut une première application spectaculaire sur le site de la Rance, anciennement occupé par un moulin de marée. Mise en service en 1967, l'usine marée-électrique nécessita la conception d'un nouveau type de turbine, le groupe bulbe, intégrant dans la même enceinte immergée une turbine Kaplan et son alternateur. Chacun des 24 groupes avait une puissance de 10 MW. Son coût fut très élevé. Elle ne fournit aujourd'hui qu'un millième de la production française. Les autres sites français, Mont St Michel, Bassin d'Arcachon ne sont pas envisageables.

- Le solaire photoélectrique direct n'était pas envisageable avec le sélénium, les semi-conducteurs adaptés ne sont apparus qu'après 1970. Par contre le **solaire à concentration**, essayé et abandonné il y a un siècle, fit l'objet d'une centrale d'essai à Targassonne en 1983.

Pour le thermique, deux sources se développaient:

- **Le gaz des Houillères** ou gaz des cokeries était brûlé dans des centrales installées sur place. Le gaz, dit naturel, découvert à Lacq près des Pyrénées en 1951 était réservé aux usages domestiques et industriels, cependant une centrale électrique construite à Artix l'a brûlé jusqu'à son épuisement en 1985.

- **Le fioul lourd** apparaissait en Europe avec des prix bas, et à partir de 1960, EDF commença à construire des centrales thermiques au fioul dont le prix était concurrentiel avec celui du charbon français, plus coûteux à extraire et dont la production régressait.

Débuts du nucléaire (1)

Fin 1945 était constitué le Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, sous la direction de Joliot-Curie et Dautry. Une première petite pile ZOÉ semblable à celle de Fermi à Chicago diverge au fort de Chatillon en 1948. L'objectif était la recherche pour rester au niveau des américains et anglais dans cette nouvelle technologie. Il était évident que cela allait déboucher rapidement sur des choix d'applications, d'abord une bombe que souhaitait de Gaulle pour ses objectifs d'indépendance et l'utilisation de la chaleur pour des centrales électriques.

En mai 1957, un comité de trois sages, le Français Louis Armand, l'Italien Giordani et l'Allemand Etsel rédigeant, au lendemain de la crise de Suez, et l'envolée du prix du pétrole, un rapport pour le futur Euratom. Ils alertaient les pouvoirs publics de la future communauté Européenne de l'urgence de diversifier l'approvisionnement énergétique charbon et fioul, avec un important programme nucléaire européen, estimé à 17 000 MW pour 1967. Ce fut plutôt le scepticisme à EDF,

contrairement aux ministères. Dès le début des divergences apparaissaient entre les hommes du CEA et l'EDF. Le CEA se voyait constructeur de centrales électriques, ce que les responsables d'EDF n'appréciaient guère. Ils estimaient qu'il fallait suivre l'évolution, mais ne pas s'engager trop vite vers une technique nouvelle ayant déjà à mener un fort développement financier dans l'hydraulique et le projet de la Rance. De plus, chez les électriciens, on n'était pas convaincu de l'intérêt d'installations thermiques dont le rendement thermodynamique s'annonçait mauvais, 30%, ils préféraient attendre la fusion contrôlée qui semblait proche à l'époque.

Après l'inauguration par la Reine d'Angleterre en 1956, de la première centrale nucléaire du monde occidental, à Calder Hall, il est décidé de se lancer en 1957 dans un essai pour cerner les nombreuses inconnues de cette technique tellement nouvelle, dont le prix de revient du kWh, point clef. Cette centrale EDF sera construite à Chinon suivant la filière étudiée par le CEA, uranium naturel comme combustible, graphite comme modérateur et gaz carbonique comme fluide caloporteur. C'était la seule voie possible puisque la France ne connaissait pas la technique d'enrichissement de l'uranium, gardée secrète aux USA. Cette filière venait d'être adoptée en Grande-Bretagne, elle permettait en plus de fabriquer du plutonium pour la bombe et le combustible des futurs surgénérateurs, filière déjà envisagée pour se passer ou presque d'uranium naturel, 50 ans plus tard.

L'histoire de Chinon fut émaillée de multiples divergences entre EDF et CEA, d'abord sur la gestion du projet entre trois partenaires CEA, EDF et les industriels constructeurs que certains voulaient réduire à un seul, ensuite sur des options techniques comme celle de la disposition du combustible dans la pile. Problème majeur qui avait fait la différence en faveur des américains dans leur course secrète avec les allemands pour la bombe. Le CEA voyait d'un mauvais œil les électriciens EDF se mêler de la physique des réacteurs.

Il y eut ensuite EDF1 de 68 MW en 1962, EDF 2 de 200 MW, et le nom changea pour Chinon 3 de 500 MW en 1967, la plus forte puissance de l'époque. Les accidents furent multiples, mais aucun ne mettait en cause la sûreté, qu'on pensait à l'époque pouvoir garantir.

Le Président de Gaulle souhaitait l'inaugurer, mais comme l'on craignait un incident technique imprévu, on lui fit inaugurer la Rance. L'eau posait moins d'incertitude que l'atome. Heureusement, huit jours auparavant, une avarie se produisait, brocardée comme il se devait par la presse. Une deuxième expérience fut engagée à St Laurent des Eaux, sur la Loire, où fut démarré un premier groupe en 1969, un second en 1971 dans la filière graphite-gaz, avec aussi nombre de problèmes. C'était inévitable, aucune technique industrielle n'arrive à maturité avant des décennies et nombre d'accidents, sources de progrès par paliers.

Pendant ces années se superposa une guerre des filières où s'imbriquaient les problèmes techniques, financiers et finalement politiques. (2) Comme on l'a résumé à l'époque « le CEA visait le prix Nobel et EDF le prix du kWh ». Les Américains, Westinghouse et son concurrent Général Electric mettaient au point chacun leur filière, PWR à eau pressurisée et BWR à eau bouillante, dont le marché était limité chez eux en raison du prix très bas du charbon. Ils cherchaient à l'exporter avec des prix de dumping, d'autant plus qu'il y avait une surproduction d'uranium enrichi, au-delà des besoins militaires.

En 1958 Schneider prend la licence Westinghouse du PWR et EDF s'associe aux Belges qui le souhaitaient pour construire la centrale PWR de Chooz dans les Ardennes qui démarrera en 1967.

Pour en finir si possible avec l'incertitude du prix du kWh, élément essentiel, une étude bilatérale est faite pour comparer deux centrales identiques de 500 MW, St Laurent des Eaux en graphite-gaz et Oyster Creek aux USA en PWR. CEA et EDF tombent finalement d'accord sur le chiffre de 1100 F par MWh en graphite-gaz et 880 F en PWR, soit 20 % de différence.

Malgré cela, fin 1967, de Gaulle qui voyait d'un très mauvais œil le PWR avec ses lunettes anti-américaines, satisfait le CEA en décidant que la future centrale de Fessenheim serait encore au graphite-gaz. Il prenait une retraite forcée en 1969 et Fessenheim fut construite en PWR.

Parallèlement, son Premier ministre Pompidou autorisait EDF à participer avec les Belges au projet de Tihange en PWR.

Le début des années 1970 fut en France une période de réorganisation des deux organismes CEA et EDF. On savait qu'il faudrait s'engager sérieusement à court terme dans l'électricité nucléaire avec les PWR, pour ne pas être en retard sur les Allemands qui, sans organisme équivalent au CEA, avaient démarré avec le REP la première centrale d'Obrigheim en 1969 (340 MW), puis Stade en 1972 (640 MW). De même les Anglais avaient démarré plus tôt, dès 1956 à Calder Hall avec le procédé Magnox, puis adopté en 1964 le graphite-gaz, mais avec des tranches limitées à 600 MW.

Le choix difficile, charbon importé ou nucléaire

Survint en 1973 le premier choc pétrolier, conséquence de l'une des guerres déclenchées par la création de l'État d'Israël ; une panique s'ensuivit chez les responsables politiques et industriels. Les pays du Moyen-Orient pouvaient étrangler à volonté l'Occident, dont l'économie commençait à dépendre de plus en plus du pétrole qu'il n'avait pas. Après une pénurie, le baril de pétrole quadruplait en 4 mois, l'essence doublait presque de prix.

La structure de la production électrique française en croissance rapide n'était plus assurée en 1973 avec de l'hydraulique, que pour moins de 40%, mais l'équipement de cette source d'énergie, poussé à fond, approchait de ses limites. Le thermique lui atteignait 60 %, dont la moitié avec du charbon, l'autre du fioul, qui se substituait progressivement au charbon trop cher et assurait seul la forte croissance de production. Une solution de ce renchérissement du pétrole, qui n'apparaissait pas temporaire, était alors de revenir en arrière vers le charbon, mais moins cher, importé, de Pologne ou par mer de pays plus lointains, USA ou Australie.

Le fioul était fourni en grande partie par le pétrole découvert à Hassi-Messaoud, au Sahara français, dont l'exploitation était confiée aux compagnies nationales, Elf et Total. Mais peu après l'indépendance de l'Algérie, celle-ci nationalisait en 1971 ce pétrole, et la France perdait ce reste d'indépendance énergétique.

La difficile décision du gouvernement Pompidou - Messmer de 1974 fut alors d'arrêter le développement en cours des centrales à fioul et d'y substituer le nucléaire plutôt que du charbon importé. Avec les enseignements de la décennie précédente, EDF s'était préparé à démarrer un programme de nucléaire basé sur le PWR. Mais Marcel Boiteux rappelle « L'accélération du plan Messmer a consisté à gravir une falaise là où on devait monter progressivement à deux tranches par an, puis trois, puis quatre. En effet, ce plan prévoyait le lancement de 13 tranches de 900 MW en 2 ans.

Le prix du kWh nucléaire était tombé à la moitié du prix du kWh fioul, argument qui justifiait cet investissement considérable de 13 milliards de F sur 5 ou 6 ans, mais EDF allait trouver facilement à emprunter avec un amortissement prévu sur 30 ans. Il fut financé en partie par l'Etat jusqu'en 1982. La France donnait confiance aux investisseurs, n'ayant jamais connu de déficit public.

Avec le recul, les fréquentes critiques du choix français de 1974 s'effacent lorsqu'on réalise que nous serions actuellement dans la difficile position des pays européens dépendants encore aujourd'hui à plus de 60% des énergies fossiles, Allemagne, Grande-Bretagne et autres, mais avec un coût plus élevé qu'eux, en raison du charbon à importer. Il n'y a jamais eu un choix du tout nucléaire, suivant les médias d'aujourd'hui, mais le maximum en hydraulique, et l'autre moitié qui s'amplifiait en nucléaire plutôt qu'en charbon importé.

Ces deux grands pays européens, RFA et GB tentés aussi par le pétrole pour la production d'électricité l'abandonnèrent, et comme la France ils ont démarré un programme nucléaire qui couvrait 30 à 40 % de leur production des années 1980. Le charbon qu'ils produisaient restait cependant leur principale source d'énergie. Deux autres pays plus riches même en hydraulique que la

France ont adopté une stratégie identique, assurer la croissance de la consommation par le thermique nucléaire, leur hydraulique étant équipée presque au maximum, la Suisse et la Suède.

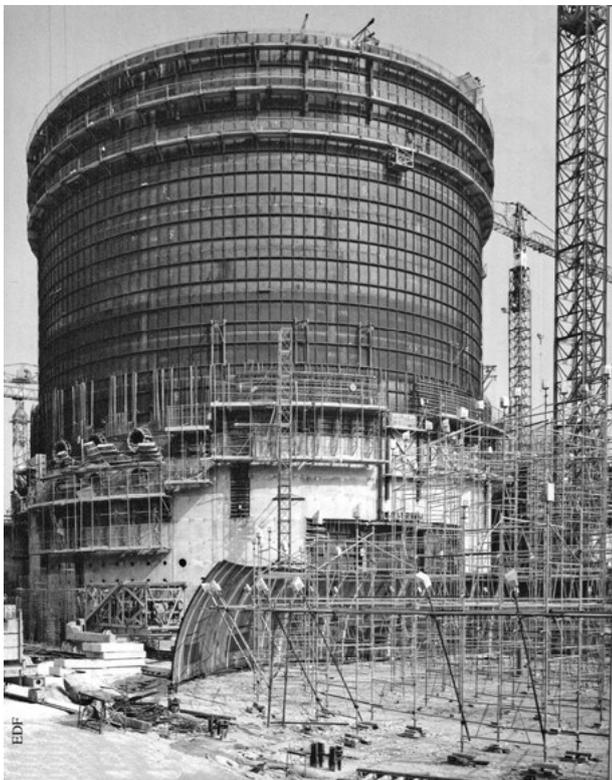
Au début des années 1980, 18 réacteurs fonctionnaient en France et 33 étaient projetés ou en construction. Mais le taux normal de la consommation d'électricité de 7% semblait se réduire progressivement à 5% puis peut-être moins. Il était difficile de freiner le développement de projets lourds financièrement et s'étendant chacun sur 5 ou 6 ans. Il en est résulté une douzaine d'années d'une relative surcapacité de production, gênante surtout financièrement. Il a été signalé que le coût du kWh nucléaire était principalement lié à la quantité de kWh produite pour amortir l'investissement, mais pas au coût du combustible. Comme tout industriel souhaitant mieux rentabiliser ses investissements, deux solutions classiques ont alors été adoptées en parallèle :

- D'une part exporter de l'électricité aux pays limitrophes, dont le kWh obtenu avec le charbon était plus cher que celui du nucléaire. Les lignes de transport existantes pour des questions de sécurité mutuelle furent développées, telle la liaison France - Angleterre.

- D'autre part, trouver en interne de nouveaux débouchés à l'électricité.

Ce fut la substitution de l'électricité au pétrole pour assurer des process énergétiques. D'abord dans de multiples industries et la locomotion terrestre sur rails, puis dans les secteurs tertiaire et domestique, pour le chauffage au fioul progressant sur le charbon, tous deux importés. Problème développé ci-après.

À l'occasion du nucléaire, la puissance unitaire des groupes thermiques, refroidis à l'hydrogène, fut portée à 900 MW, plus élevée que celle des centrales thermiques à flamme du dernier palier, 600 MW. La première centrale REP de cette puissance, Fessenheim, fut mise en service en 1978, utilisant l'eau du Rhin pour refroidir le condenseur.

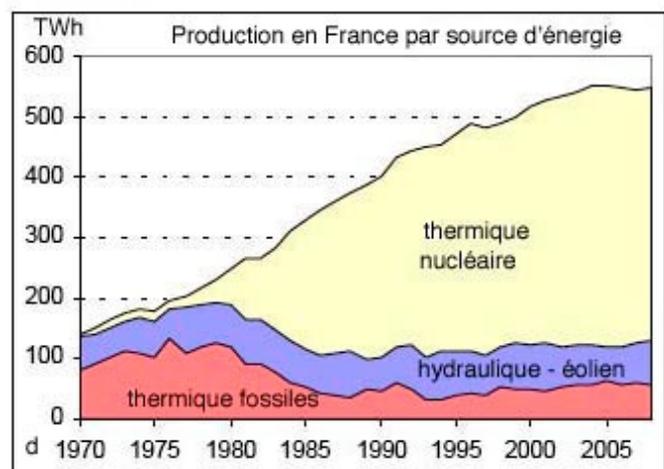


C Construction du réacteur de Bugey 2 --1974

Les centrales dites de troisième génération, améliorées sur les plans techniques, sûreté et combustibles seront portées à 1600 MW, comme les thermiques classiques, afin de réduire le coût d'investissement du MW.

Ensuite ce fut Bugey au bord du Rhône, dont la photo montre la construction du bâtiment de confinement du réacteur en acier doublé d'un mètre de béton (c).

La puissance unitaire des groupes a continué à croître par paliers : après 34 réacteurs de 900 MW, les 20 suivants atteignaient 1300 MW, les 4 plus récents 1450 MW. S'y ajoutait un premier RNR surgénérateur de 300 MW, Phénix à Marcoule, dont l'énergie était utilisée pour l'élaboration du combustible nucléaire. Il fut suivi du prototype industriel Superphénix de 1200 MW.



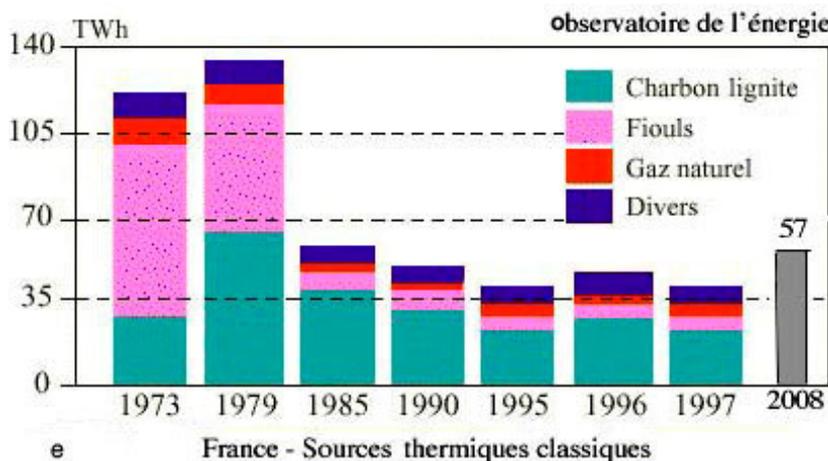
Ce maximum ne sera probablement plus dépassé, car le risque d'une panne sur une très grosse unité en pleine charge peut déstabiliser brusquement le réseau, provoquant un black-out.

La croissance par paliers de puissance des groupes thermiques, n'était pas conditionnée par des améliorations techniques des chaudières, à flamme ou nucléaires, mais par celles des turbines à vapeur et alternateurs, identiques dans les deux cas.

Le nucléaire substitué aux énergies fossiles

À partir des années 1980, la production d'électricité à partir du fioul d'abord, puis du charbon ont été transférés progressivement sur le nucléaire qui permettait en plus d'assurer la forte croissance des besoins encore à 6 ou 7% par an, telle que le montre le diagramme (d). Une faible production à partir de thermique classique, environ 50 TWh, fut toujours conservée pour couvrir les pointes d'hiver (e), encore aujourd'hui, mais de préférence avec les turbines à gaz récentes. Il a toujours été plus rentable pour les pointes de faire appel à des centrales dont le kWh est plus cher et l'investissement réduit, que d'augmenter pour ces faibles durées la puissance des centrales de base, surtout nucléaires.

L'hydraulique, qui avait représenté 50 % de la production  le, n'en assurait plus que 30%, la forte croissance de la consommation ne pouvant être assurée que par le thermique nucléaire. En 1990 l'hydraulique ne représentait plus que 20% ; et les 10 ou 12% des années 2000, que parfois on assimile à un choix du « tout nucléaire » n'est que la



conséquence d'un accroissement permanent de la consommation thermique à défaut de l'hydraulique arrivée à son maximum. Le choix était ni pétrole, ni charbon importé, mais hydro-nucléaire ; avec cependant un minimum de charbon ou fioul pour les pointes journalières ou saisonnières, environ 10%.

C'est une logique classique dans toute industrie de se concentrer sur le processus le plus valable à une époque pour y accroître son savoir-faire, évitant disperser ses recherches et compétences sur trop de solutions en parallèle.

Cette croissance résultait aussi d'une stratégie de transfert, à coût comparable, sur l'électricité nucléaire de tous les processus industriels ou autres consommant du pétrole, pour réduire cette dépendance. Cela réussit assez bien dans les industries de transformation, de même dans le secteur tertiaire avec le chauffage électrique, mais aussi dans les transports urbains avec les trolleybus qui commençaient à remplacer les tramways, lesquels disparaissaient en raison de leur coût d'infrastructures et intégration difficile dans les extensions urbaines. La voiture, l'autobus à gazole étaient alors un symbole de modernité intouchable, on aménageait les voies urbaines et routières pour faciliter leur circulation, alors qu'aujourd'hui on cherche à l'éliminer de la ville par de multiples rétrécissements, pièges et complications diverses.

Chauffage électrique et géothermie

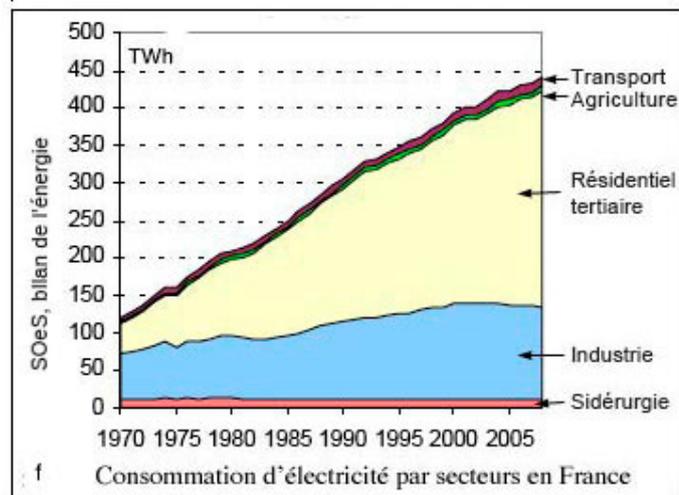
Vers 1950/60 était apparue l'utilisation du fioul pour le chauffage des locaux, qui jusque-là se faisait au charbon. La préoccupation de l'époque étant une dépendance limitée des pays producteurs de pétrole, on envisagea de promouvoir le chauffage à partir de l'électricité nucléaire au lieu du fioul, le gaz n'étant pas encore envisagé. Le chauffage électrique, assez utilisé en Europe du Nord, n'était alors en France qu'un chauffage d'appoint onéreux.

Pour réduire ce coût élevé, on obligea les logements neufs souhaitant ce nouveau chauffage pratique et efficace à prévoir une forte isolation thermique.

Cela déclencha la mise au point de nouveaux moyens d'isolation des bâtiments, doublage des murs par isolement à la laine de verre, invention du placoplâtre, des vitres doubles, fenêtres étanches à l'air, ventilation contrôlée VMC. Il allait de soi que cette isolation coûteuse pouvait aussi s'appliquer aux locaux chauffés au fioul, mais avec un amortissement plus long, le chauffage fioul restant nettement moins cher.

Actuellement, 30% des logements sont à chauffage électrique. Bien isolés, ils ont été construits en majorité après 1975 et consomment l'hiver en chauffage près de 10% de la production. D'où un accroissement sensible de la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire (f). Depuis les années 1995, de nouvelles campagnes d'économies d'énergie incitent à renforcer encore un peu plus l'isolation des constructions nouvelles, mais pour les anciens immeubles urbains, une large majorité, c'est difficile.

EDF essaya aussi de lancer le chauffage électrique géothermique par pompe à chaleur, pour l'habitat individuel disposant d'un terrain, mais les compresseurs avaient un coefficient de performance de 2 à 2,5, un peu moins élevé qu'actuellement. Le succès fut mitigé. (3) Depuis 2000 ce chauffage se développe à nouveau, surtout le système air/air ayant l'avantage d'être réversible, c'est-à-dire chauffage en hiver et climatiseur en été, le système sol/sol ne concernant que des maisons neuves avec terrain.



L'électricité nationale devient européenne

À partir des années 1980, l'accroissement de la production possible d'électricité, programmée sur celle des années précédentes, commençait à dépasser la consommation intérieure. Pour mieux rentabiliser ses centrales, EDF prit l'option de l'exportation vers les pays limitrophes en augmentant les capacités d'interconnexions. Après un maximum vers 2000, le solde exportateur des échanges a décliné pour compenser la croissance de la consommation interne de 1 à 2% par an.

Ces échanges avec les pays voisins étaient possibles grâce à l'interconnexion progressive des réseaux nationaux dont la pulsation bat à l'unisson, à la fréquence synchrone de 50 périodes. En effet était constituée dès 1951 l'UCTE, Union pour la Coordination du Transport Électrique regroupant 450 000 habitants de l'Europe de l'Ouest, sauf Angleterre, Irlande et pays scandinaves. Cette association s'est regroupée depuis 2009 avec d'autres organismes européens au sein de l'ENTSO-E.

En 1996 une directive européenne imposait la suppression des monopoles nationaux pour permettre l'ouverture progressive du marché de l'énergie à la concurrence, en particulier de l'électricité, dans l'objectif d'une baisse des prix par la création de bourses d'échange de l'électricité. Mais les lois des économistes ne sont que des hypothèses intellectuelles, souvent contredites par la réalité des marchés ; la tendance est nettement à la hausse de l'électricité depuis 2005, en plus du surcoût des énergies renouvelables fortement subventionnées.

Comme dans les autres pays de l'U.E, les activités d'EDF, ancien Etablissement Public Industriel et Commercial ont été partagées en trois sociétés :

1- La production, les centrales, qu'EDF, société anonyme depuis 2004, conserva pour la plupart, en parallèle avec d'autres partenaires, GDF-Suez, C.N.R. Cette décision de transférer au privé la

production d'électricité nucléaire peut s'avérer dangereuse en termes de sûreté. Le privé est astreint à la rentabilité, peu compatible avec la sécurité maximale.

2- La gestion du **réseau de transport** 400 à 63 kV, interface entre la production et la distribution, a été transféré en 2001 à une filiale indépendante, RTE, Réseau de Transport d'Électricité, contrôlée par la CRE, Commission de Régulation de l'Énergie.

Les fonctions de RTE (4) sont schématisées en fin du chapitre. Elle achète l'électricité en sortie de centrale aux producteurs, principalement EDF la transporte jusqu'à proximité des points de consommations, aux postes sources où s'approvisionnent les distributeurs, ERDF entre autres. Elle a la difficile mission de la gestion technique de l'équilibre en instantané entre la production d'une part, programmée le veille avec une centaine de fournisseurs, sauf énergies intermittentes et aléatoires éolien et solaire, d'autre part la consommation gérée par les distributeurs, estimée la veille à 1 ou 2% près.

3- **La distribution** aux moyennes tensions HTA < 50 KV, puis basse tension 380/220 V ont été transféré en 2008 à ERDF, Electricité Réseau Distribution France, filiale à 100% d'EDF, avec mission de service public, en parallèle avec d'autres sociétés de distribution qui ont du mal à croître. Elle achète l'énergie à RTE et assure encore 95% de la distribution, répartie sur 8 régions.

Les énergies renouvelables, EnR

La Commission européenne a fait, sans doute provisoirement, une exception importante à la libre concurrence qu'elle impose pour tout produit, en particulier l'énergie électrique : **l'obligation d'achat** par le gestionnaire du réseau national, à prix élevé pour l'éolien, très élevé pour le solaire, bien au-dessus de celui des bourses d'échange libre, imposées par l'U.E.

Cette disposition, destinée aux pays charbonniers pour encourager la limitation du CO₂, en principe responsable du réchauffement climatique, a pourtant déclenché le développement en France de ces énergies, bien qu'inutiles puisque 90% du mix énergétique français hydro-nucléaire ne dissipe pas de CO₂. Le thermique étant conservé à environ 10% uniquement pour fournir les pointes, en particulier l'hiver. Il a été souligné en effet que le kWh nucléaire, intégrant un faible coût de combustible, et un coût élevé des charges d'investissement, devait pour être rentable fonctionner au taux de charge annuel le plus élevé possible, au moins 5 à 6000 h.

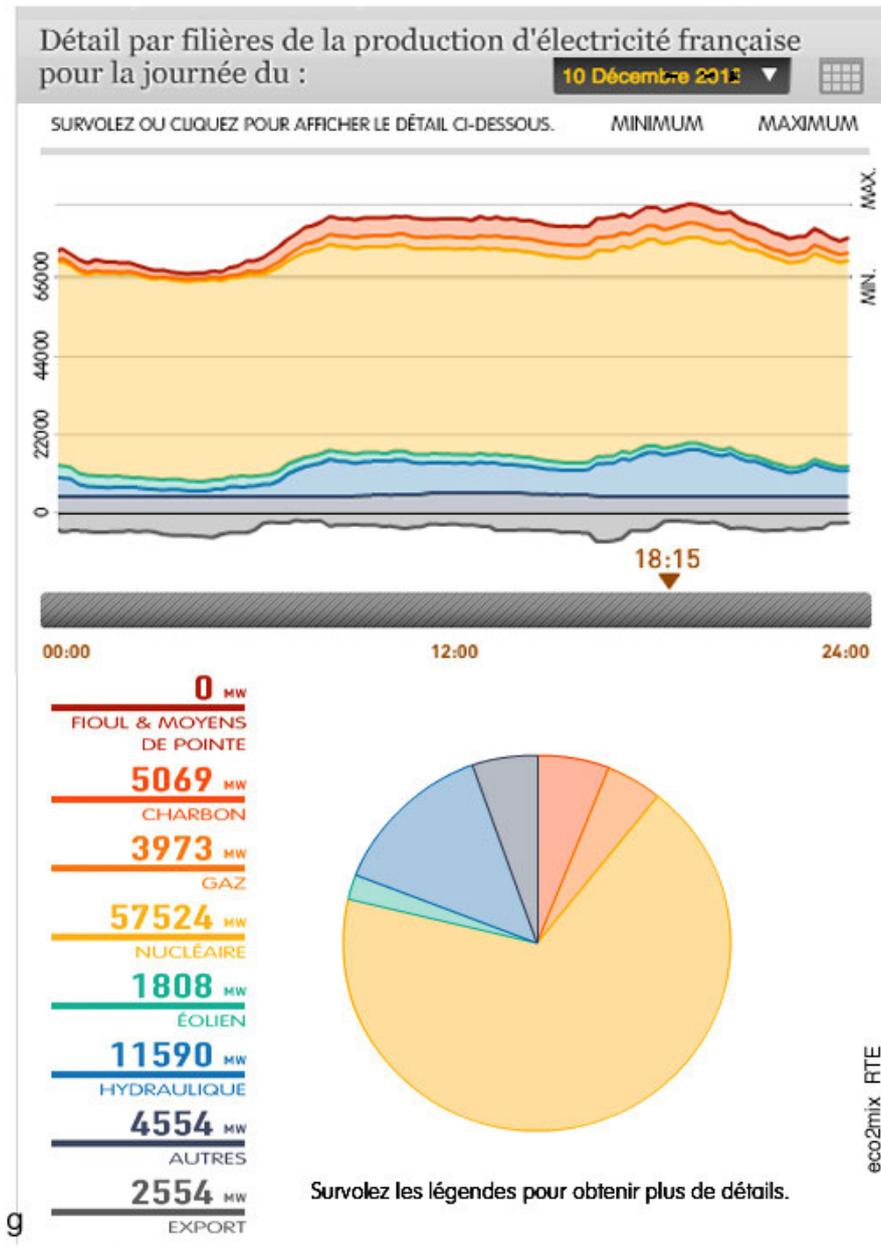
Ce développement par des sociétés privées des EnR, autres que l'hydraulique déjà exploitée, résultait à la fois de leur forte rentabilité grâce à l'obligation d'achat à prix très élevé, et de la pression d'une écologie irréfléchie.

Débutée vers 1995, la production éolienne de 2010 atteignait en France 9,7 TWh avec 5750 MW installés, soit 1,7% de la production totale, et un facteur de charge très faible de 19,3%.

En solaire, 1050 MW installé ont produit 0,65 TWh, soit 0,1% du total, et un facteur de charge insignifiant de 7%. Ce chiffre prévisible s'accompagne économiquement par un investissement très élevé, inutilisé 93% du temps.

Pour que tout usager puisse apprécier la composition du mix énergétique de l'électricité qu'il consomme, RTE met à sa disposition cette indication sur son site web, mise à jour en temps réel tous les ¼ h. Pour y accéder rapidement, il suffit d'indiquer au moteur de recherche : eco2mix. L'information journalière reste disponible pendant deux mois. (g -p. suiv.)

En 2001 une directive européenne fixait à 21% le taux d'EnR dans la consommation électrique en 2020, théoriquement pour réduire la production de CO₂. On aurait dû logiquement considérer que le nucléaire répondait déjà à ce problème, la France rejetant pour sa faible production d'électricité thermique 5 fois moins que l'Allemagne. Mais pour des raisons inconnues ce fait évident fut ignoré par la Commission européenne. La France s'engagea dans le développement inutile et coûteux de l'éolien et du solaire, mais rentable pour les investisseurs privés, ce surcoût étant réparti sur l'ensemble des usagers de l'électricité.



Par contre, la France a un sérieux retard pour la biomasse, EnR non intermittente et abondante avec ses forêts et son agriculture. Alors que l'Allemagne produit 5,4% de son électricité à partir de la biomasse (5,9% avec l'éolien), l'Europe 3,4%, la France seulement 0,8%.

En réalité, cette directive a été interprétée différemment, suivant les pays, d'une façon assez surprenante :

— En Allemagne, on constate, 10 ans plus tard, à mi-chemin de l'objectif, pendant la première décennie 2000-2010 :

- la production annuelle totale a augmenté de 7,3 %.
- la production fossile est restée constante en quantité, TWh, mais a un peu baissé de 62,7% à 58,6 % par augmentation du total.
- le nucléaire a baissé de 29,5% à 22,6 % avec baisse importante de 17,7 % en TWh.
- l'hydraulique est restée constante en TWh, avec baisse de 4,5 % à 4,2 %.
- l'éolien a augmenté de 1,6 % à 5,9 % - croissance de 3,9 fois

- la biomasse a augmenté de 0,8 % à 5,4% - croissance de 7,6 fois
- le solaire a augmenté de 0,01 % à 1,9 % - croissance de 200 fois, partant de presque zéro.

L'Allemagne considère donc que pour sauver la planète, la production d'EnR doit d'abord supprimer le nucléaire, 1/5 en 10 ans, plutôt que réduire l'utilisation des fossiles (5). Mais à ce rythme pourtant soutenu du développement des EnR, les 4/5 de nucléaire restant nécessiteront encore 40 ans. Il est donc incontournable que pour tenir en 2020 son propre objectif de suppression totale du nucléaire, l'Allemagne va fortement accroître ses dégagements de CO₂ avec la construction de centrales au charbon et au gaz russe.

— En France, on interpréta la directive de l'U.E autrement : développement d'éolien et du solaire qui ne réduisent pas le CO₂, mais l'augmente indirectement, avec les centrales thermiques de régulation, suivant le paradoxe signalé (II-5) D'où nécessité de nouvelles centrales avec turbine à gaz, adaptées techniquement et financièrement à cette utilisation intermittente. La France développe ainsi les EnR intermittentes uniquement pour « être dans le vent ». Elles couvrent partiellement l'accroissement de consommation.

On se retrouve ainsi devant une confusion entre objectif et moyen :

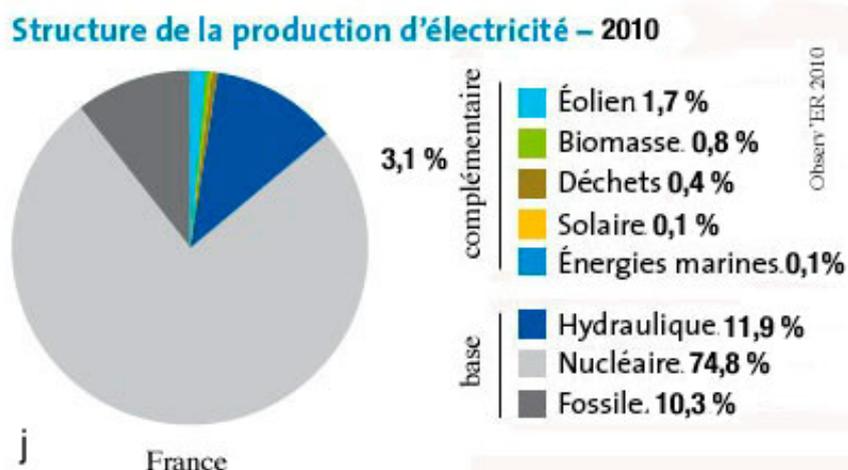
L'objectif français comme allemand est bien le développement des EnR, mais pas la réduction du CO₂ des fossiles, qui s'accroît même en France et ne diminue pas en Allemagne. Il est regrettable que l'Europe persiste à faire l'autruche, sans politique énergétique cohérente et lucide, que l'on habille avec un vocabulaire séduisant, mais à la signification floue : transition énergétique – réseaux intelligents etc.

En EnR, l'objectif français pour 2020 est de 19 000 MW pour l'éolien et de 4500 MW pour le solaire. Tant que la production annuelle d'énergie intermittente ne dépassait pas 1 à 2%, l'impact sur la gestion du réseau était faible. Mais avec ces valeurs élevées, RTE, responsable de la sûreté du réseau, a été chargé par le gouvernement d'engager travaux et dispositions pour intégrer les éoliennes intermittentes dans le système électrique avec trois procédures nouvelles :

- L'observabilité, capacité de disposer de la mesure de la production en temps réel.
- La prévision, par un modèle informatique développé avec Météo France.
- La commandabilité, pour commander à distance, en temps réel les installations de production depuis les dispatchings.

RTE évalue à environ un milliard d'euros cumulés d'ici 2020, les investissements indispensables pour intégrer au réseau un parc éolien terrestre d'environ 19 000 MW (7). Ils seront répercutés sur le prix du kWh qui va inéluctablement monter sous divers prétextes.

Production électrique en France en 2010



Le diagramme (j) illustre la répartition des sources de production dont le total est de 573 TWh (+ 5,7% après une baisse de 0,8 % en 2009). Le solde export/import étant de + 48 TWh (- 15%), la consommation s'établit à 525 TWh (+ 3%).

Les 3/4 de cette énergie ont été fournis par le thermique nucléaire comprenant 58 réacteurs sur 12 sites, totalisant une puissance de 63,1 GW. Ils ont produit 430 TWh avec un taux de charge annuel moyen de 78%.

L'accroissement de production annuelle moyenne de 1,4% sur 10 ans nécessite une nouvelle centrale de base tous les 20 ans. La dernière, Golfech, ayant été mise en service en 1994 ; la prochaine, Flamanville, sera opérationnelle en 2013. Le nombre de centrales hydrauliques reste constant. Les centrales thermiques classiques, en particulier au gaz, couvrent les pointes et constituent la réserve nécessaire pour les EnR intermittentes en développement. Dix centrales avec turbines à combustion au gaz, totalisant 4300 MW sont prévues pour mise en service en 2011. D'autres seront indispensables pour accompagner le programme d'EnR intermittentes engagé pour 2020. D'où augmentation du CO₂.

Les pertes en ligne sont le plus grand consommateur d'énergie (6). Elles représentent en moyenne 7 % de la production, 3% sur le réseau de transport RTE, 4% sur les réseaux de distribution ERDF, surtout en basse tension. Pour réduire ces pertes les centrales de production sont réparties au mieux sur l'ensemble du territoire, au voisinage des centres de consommation.

Deux régions françaises n'ont pas de centrales proches, la région PACA, et surtout la Bretagne, qui a refusé la centrale nucléaire prévue en bord de mer à Plogoff en 1980. Elle ne produit que 8% de sa consommation, est alimentée par une longue ligne et prochainement par une centrale au gaz, considérée plus écologique que le nucléaire, malgré sa production de CO₂.

Il a été parfois proposé, pour tenir compte des pertes, que le prix du kWh soit moins élevé dans les régions proches d'une grande centrale, qui peuvent par surcroît en subir les désagréments. Mais la démocratie consiste en principe à mutualiser avantages comme inconvénients.

En conclusion

L'exemple français montre que la structure de la production électrique de chaque pays du monde est un cas particulier, fonction d'un certain nombre de contraintes : disponibilité et coût des ressources propres, possibilités d'importations, poids de l'histoire et des problèmes politiques internes ou externes. Il faut au moins deux décennies pour faire évoluer cette structure de production basée sur des critères technico-économiques. Une politique énergétique se définit pour 30 à 50 ans, temps minimum de construction et d'amortissement d'une centrale, en fonction d'hypothèses chiffrées, non d'espoirs ou d'idéologie, et ne peut pas évoluer en fonction d'échéances électorales à 3 ou 5 ans.

Compléments

1 - Les éléments cités sur le choix du nucléaire en France sont empruntés principalement à - JF Picard, A. Beltran, M. Bungener : Histoire de l'EDF, Dunod-1985.

Rapport Charpin - Etude économique prospective de la filière électro-nucléaire. 2000

2 - Les **budgets** nucléaires des années 1950 et 60 en France étaient très élevés, majoritairement consacrés à l'arme atomique et ses vecteurs, dont les sous-marins les plus coûteux. Le coût de la mise au point de la filière graphite-gaz abandonnée n'a apporté finalement qu'un savoir faire pour la suite. Comme dans tous les autres pays sans travaux sur l'arme atomique, telle l'Allemagne, la filière américaine PWR adoptée en 1973 n'a coûté à EDF que des redevances temporaires de licence à Westinghouse - Voir rapport Charpin

3 - La **pompe à chaleur** a été adoptée en 1963 pour une réalisation innovante et spectaculaire à l'époque, le chauffage des 100 000 m² de la célèbre Maison de la Radio à Paris par pompe à chaleur.

L'eau de la source chaude, déjà à 27° C, est pompée à 600 m de profondeur dans la nappe fossile du Bassin Parisien. Elle est rejetée à 7° C dans la Seine après avoir cédé ses calories.

4- RTE, Réseau de Transport Électrique, est une filiale, indépendante d'EDF, de 8500 personnes, créée en 2001 en application de la directive européenne de 1996 imposant la libéralisation du marché de l'énergie, comme dans chaque pays. Elle assure la gestion technique et financière du transport d'électricité de 50 à 400 KV depuis les centrales des différents producteurs jusqu'aux réseaux des distributeurs (50 KV à 220 V). De même les importations/exportations avec les pays voisins.(j)

Elle reçoit l'énergie des 650 sites de production en France, dont une centaine importants, et la transmet à 25 entreprises de distribution. Elle échange avec l'étranger limitrophe par 45 interconnexions.

Son rôle 24h/24 est la gestion des flux d'électricité pour ajuster instantanément l'offre à la demande, d'après une prévision établie avec les acteurs du marché (producteurs, distributeurs, gros consommateurs). Ils transmettent à RTE, la veille, toutes les informations relatives aux programmes de production ou consommation prévus, aux possibilités de modulation de cette production ou consommation, et aux échanges avec l'étranger. Avec l'ensemble des autres paramètres, météorologique, activité économique prévue, RTE établie la prévision de consommation électrique la veille pour le lendemain, afin que l'équilibre offre-demande soit assuré en temps réel, avec des marges de production disponibles pour d'éventuels aléas. La marge instantanée entre la prévision et la réalisation se situe généralement entre + ou -1 à 2%.

Ses moyens sont un centre national d'exploitation à St Denis et 7 centres de conduite (dispatching) régionaux. RTE assure l'entretien, l'exploitation, le développement du réseau de transport, soit 100 000 km de lignes de 63 – 90 – 225 et 400 kV, une centaine de postes d'interconnexion, 2300 postes sources alimentant la distribution.

5 - Belbéoc'h Bella et Roger - Sortir du nucléaire, c'est possible, avant la catastrophe, p. 147, ed. l'esprit frappeur, Paris 2002.

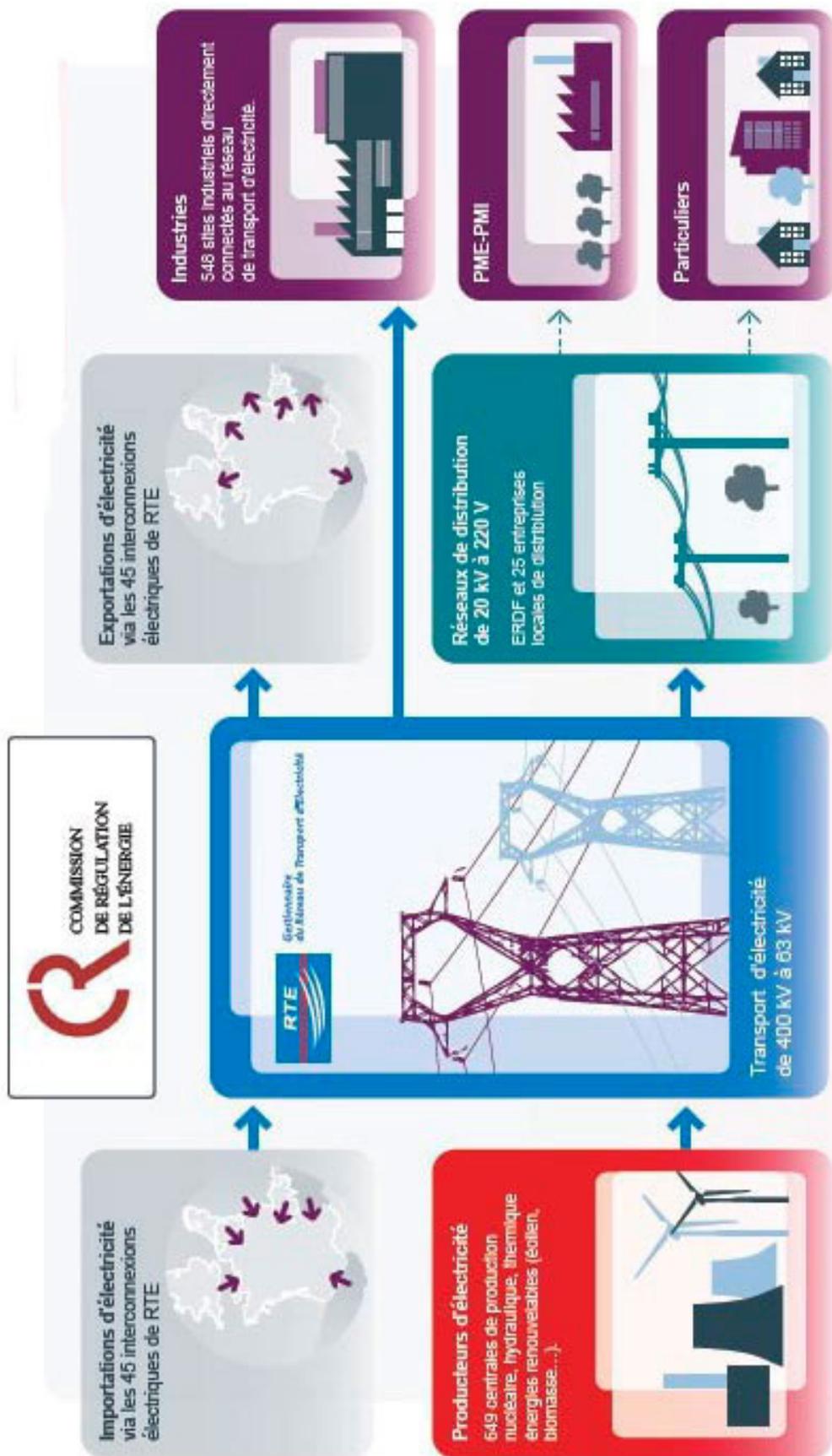
6 - Pertes

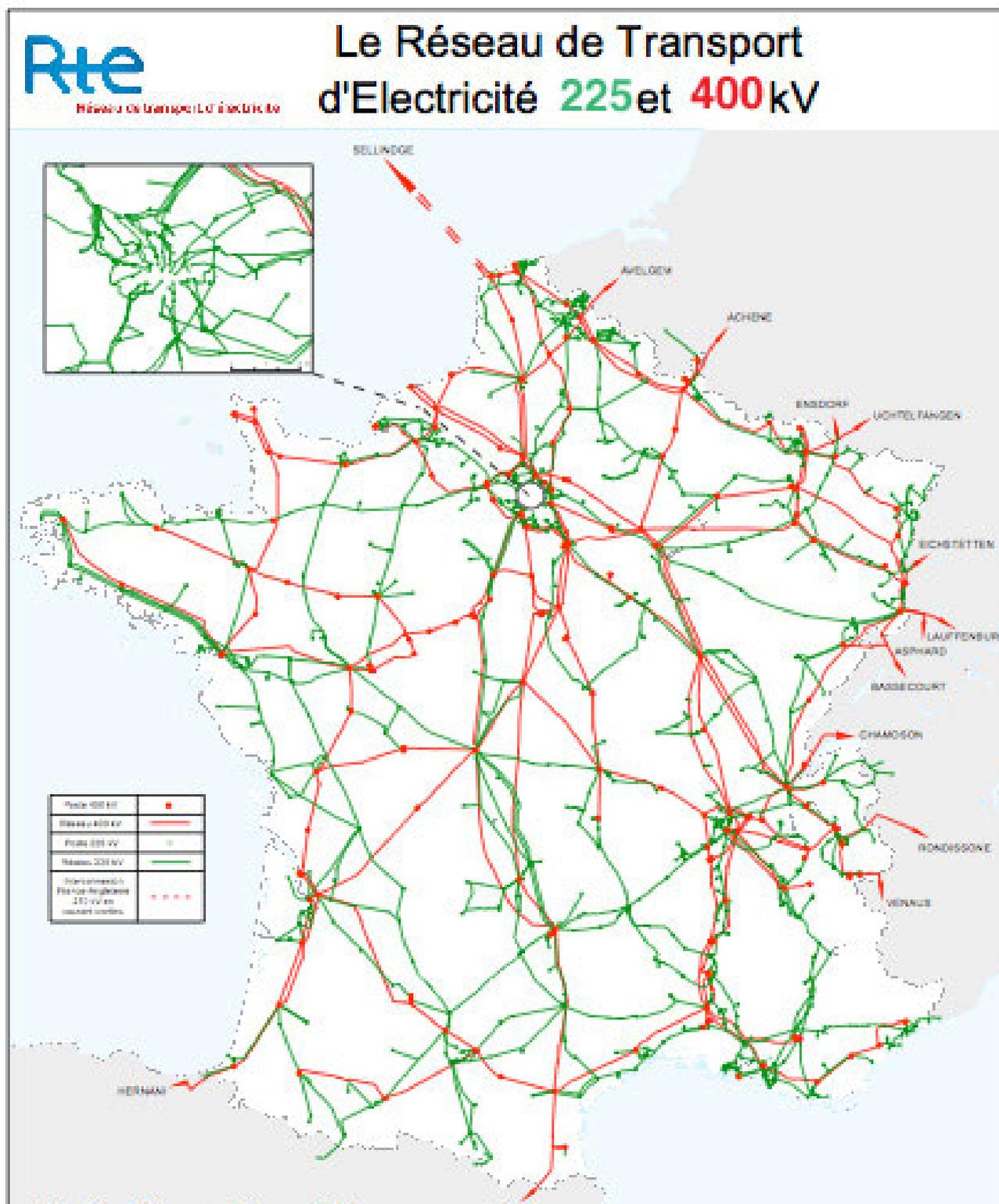
Dans un réseau maillé, comme celui de Transport, la circulation du courant est automatiquement plus intelligente que celle des automobilistes (sans GPS) sur le réseau routier. Elle optimise ses propres pertes, en prenant les chemins dont l'impédance (essentiellement la résistance) donc la chute de tension sont les plus faibles. Ainsi le courant consommé par un utilisateur, vient en principe, de la centrale la plus proche.

D'autre part, nous concevons que pour réduire économiquement les pertes d'énergie, il faut augmenter la section des conducteurs et la résistance mécanique des pylônes les supportant, donc le coût de l'investissement. Cet ancien problème d'optimisation technico-économique avait fait l'objet au XIX^e siècle la règle de Thomson (l'Anglais William ou Lord Kelvin) : Adopter une section de cuivre (aujourd'hui de l'alu) telle que l'intérêt annuel des sommes investies dans la ligne et ses supports soit égal au coût des pertes. Lorsque l'on augmente l'un de ces facteurs, l'autre diminue, choix fonction des disponibilités financières à la construction.

7 - RTE –dossier de presse 30/11/2009 p.10, disponible sur rte-france.com

Schéma du système électrique français





FIN du Tome II

Bibliographie, webographie

Celle relative à un chapitre figure dans les Compléments, en fin de chaque chapitre.

Une bibliographie générale pour l'ensemble du livre figure en fin du tome V

Errata

Ces livres, contenant des milliers d'informations, recueillies dans plus d'une centaine de documents, il en résulte statistiquement quelques erreurs. Le lecteur est donc remercié de signaler les erreurs de fait ou d'interprétation qu'il aura noté, avec leurs sources accessibles, accompagnées de ses remarques et apports personnels à :

contact@electricite-decouvreur-inventeurs.com

Si le lecteur souhaite poursuivre son exploration dans les autres domaines de la genèse du monde électrique, il peut choisir parmi les 4 autres tomes, dont les sommaires sont joints.

Il peut lire auparavant plusieurs extraits de chapitres sur le site web :

ÉLECTRICITÉ – DÉCOUVREURS – INVENTEURS

electricite-decouvreur-inventeurs.com

L'électricité, Découvreurs et Inventeurs

Sommaires

Tomes

I –Défricheurs de l'inconnu

Au lecteur

- 1- L'électricité, essai de définition
- 2- Magnétisme et électricité statique. Des chinois à Coulomb
- 3- L'électricité dynamique, la pile- Galvani, Volta – 1800
- 4- Découverte de l'électromagnétisme - Oersted, Ampère –1820
- 5- Découverte de l'Induction – Arago, Faraday – 1831
- 6- Lois et théories

II – Générer l'électricité

- 1- Générateurs électrochimiques, pile, accu, stockage
- 2- Générateurs statiques thermo/photo/piezo-électriques
- 3- Générateurs électromécaniques à induction
- 4- Bobine d'induction, Page, Ruhmkorff
- 5- Quelles énergies pour produire l'électricité – 1880-2011
- 6- Historique de la production d'électricité en France

III – Et la lumière fut – L'électrochimie

- 1- Lampe à arc
- 2- Lampe à incandescence
- 3- Lampe à décharge
- 4- L'exposition internationale d'électricité à Paris - 1881
- 5- Développements et réseaux d'éclairage électrique
- 6- Electrochimie –Électrométallurgie

IV–Vecteur d'énergie

- 1- Moteurs en courant continu
- 2- Transporter *la Force* - Guerre des courants, l'alternatif
- 3- L'alternatif, nouveau vecteur d'énergie, nouvelles machines
- 4- Centrales et réseaux de transport
- 5- Locomotion électrique par terre, mer, air.

V – Vecteur d'information

- 1- Télégraphe
- 2- Téléphone
- 3- Découverte des ondes électromagnétiques – Maxwell – Hertz
- 4- Découverte de l'électron – J.J. Thomson – Tubes à vide – 1897
- 5- TSF – Radiophonie
- 6- Télévision
- 7- Découverte de l'effet transistor, semi-conducteurs –1948



Tome III - Et la lumière fut - Electrochimie



Tome II - Générer l'électricité



Tome V - Vecteur d'information



Tome IV - Vecteur d'énergie

