

L'électricité : vecteur énergie de demain ?

Jean-Marie PETER¹

L'énergie est la grandeur qui permet les transformations, les mouvements, le chauffage, et l'apport de notre nourriture. Sans énergie, un homme meurt rapidement. L'énergie électrique, apparue seulement au 19^{ème} siècle y joue un rôle particulier. Quels en seront les progrès ? Quelles conséquences ? Comment produire et utiliser cette énergie dans un monde assoiffé d'énergie qui va être confronté au réchauffement climatique ?

NB : Cet article se limite à l'électricité, et ne traite donc pas d'autres énergies thermiques renouvelables ni de la géothermie.

1. L'ÉLECTRICITÉ « VECTEUR D'ÉNERGIE »

L'énergie électrique est une énergie particulière ; elle ne se voit pas, et n'est pratiquement pas disponible à l'état naturel. Nous ne savons pas la produire autrement que par transformation des autres formes d'énergie. De plus, à quelques exceptions près, nous ne l'utilisons pas à l'état d'électricité, mais sous d'autres formes d'énergie : mécanique, thermique, lumineuse, chimique... L'électricité est donc pour notre activité humaine essentiellement un moyen de transmission d'une forme particulière d'énergie : un « VECTEUR D'ENERGIE ».

Dans la suite de l'exposé, nous emploierons le terme d'électricité pour désigner l'énergie électrique.

2. INFORMATION ET ÉNERGIE : DEUX GRANDEURS TRÈS DIFFÉRENTES

Habitué des ordinateurs et des télécommunications, beaucoup de nos concitoyens ont acquis la culture de l'information, et quelquefois perdu la culture de l'énergie. L'énergie se conserve, et suit les lois de la thermodynamique, l'information peut se multiplier et suit des lois différentes. Il en résulte (voir Figure 1) des propriétés différentes.

	ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	INFORMATION
TRAITEMENT	Se conserve ; mais pertes	Pas de pertes
PRODUCTION	Pas produite : obtenue par transformation d'une autre énergie. Pertes	Facile à produire
STOCKAGE	Non	Aisé
PARTAGE	Appauvrit le donateur	Pas de pertes
TRANSMISSION	Couteux si Ligne THT > # 600km Câbles > # 50 km	Pas de limite pratique de distance
RISQUES	Production & Utilisation	Pas de risques physiques
COÛT	Proportionnel à la puissance	Faible
PROGRÈS	Lents	Très rapides

Figure 1 : L'énergie est soumise aux lois de la thermodynamique, et tout n'est pas possible.

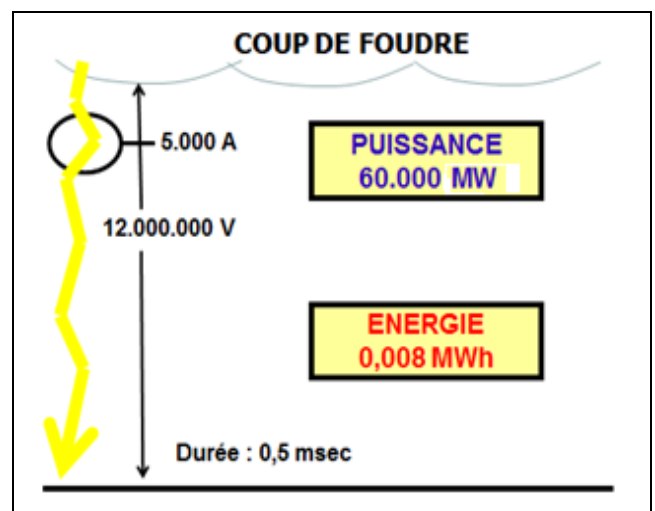


Figure 2 : Un coup de foudre moyen a une puissance égale à celle de tout le parc électronucléaire français, et l'énergie mise en jeu y est très faible, 0,08 MWh ce qui correspond, au tarif de production, à environ 4 euros.

Pour résumer, il y a trois points essentiels à retenir chaque fois qu'est envisagé un projet concernant l'énergie :

¹ Membre de l'Association Sauvons Le Climat <http://www.sauvonsleclimat.org/>

1. le rendement est un point essentiel. Ne pas gaspiller l'énergie sera essentiel dans un monde assoiffé d'énergie.
2. tout n'est pas possible,
3. les délais et les coûts alourdissent souvent bien des projets.

Les medias ont faussé la culture du public en confondant trop souvent puissance et énergie². L'analyse d'un coup de foudre (voir Figure 2) est un bon exemple qui permet de mieux comprendre la différence de nature entre énergie et puissance. La grandeur essentielle est l'énergie, la puissance n'est à un instant donné que la quantité d'énergie par unité de temps. Définir les sources d'énergie par leur puissance (en kW ou en MW comme le font les medias) ne permet pas de connaître leur production en énergie. Il n'en reste pas moins que les factures d'électricité sont exprimées en kWh, et que les prix industriels le sont en MWh.

3. PROGRÈS APPORTÉS PAR L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

La vie industrielle, puis la vie domestique, ont été transformées par le développement de l'électricité. Chaque habitation dispose, dans nos pays, d'une machine à laver, et les logements sont envahis d'appareils électriques, aspirateurs, cuisinières, four, éclairage, etc. Dans l'industrie, où l'équipement est plus perfectionné, il est plus ancien. Enfin la médecine, comme la recherche, ont énormément progressé grâce aux équipements électriques. Nous allons montrer par des exemples, souvent peu connus, comment l'utilisation de l'électricité a apporté de grands progrès.

3.1. LE CONVERTISSEUR : UN OUTIL DE PROGRÈS

Comme la boîte de vitesse et l'embrayage ont permis le développement de l'automobile, le transformateur, qui en électricité joue un rôle analogue à celui d'une boîte de vitesse, a été à la fin du 19^{ème} siècle l'organe qui a permis le développement de l'électricité.

La mise au point dans les années 70 du convertisseur grâce aux technologies de l'électronique de puissance a permis de réaliser un nouveau type de transformateur, nommé convertisseur, qui se distingue par de nouvelles possibilités aux conséquences très étendues. Les convertisseurs ont les caractéristiques suivantes :

- Réglables de façon continue
- Un excellent rendement (96 à 98%)
- Capables de fonctions très étendues³
- Plus légers que les transformateurs 50 Hz
- Capables de passer d'une forme d'électricité à une autre forme (continu-alternatif ou vice versa).

Le convertisseur est aujourd'hui l'élément de base dans presque tous les systèmes du Génie Electrique, du watt à la centaine de MW, de quelques volts, à la centaine de kV. Il est à l'origine de la majorité des progrès en électricité, que ce soit pour l'amélioration des rendements, ou le développement de nouveaux procédés.

3.2. ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS

Les convertisseurs qui peuvent fonctionner à des fréquences élevées permettent de réduire dans des proportions importantes les poids de fer et de cuivre des machines électriques associées. L'exemple de la figure 3 montre un convertisseur qui permet de diviser par 10 le poids, et de réduire le volume d'un équipement de soudure.

Ce progrès entraîne :

- Une réduction des quantités de matières, un point très important dans un univers limité
- Une moindre consommation d'énergie pour les transports, la manutention, et la fabrication

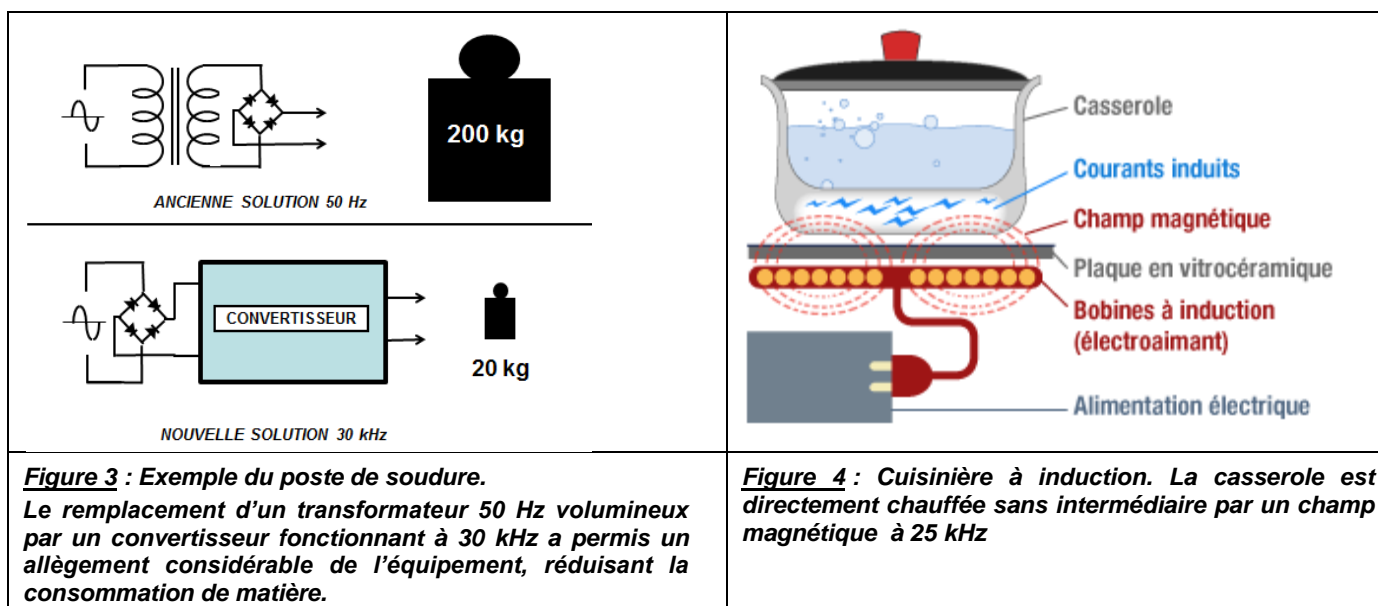
On trouve des exemples analogues dans de très nombreux systèmes d'alimentation électrique.

3.3. ÉQUIPEMENTS ÉLECTRODOMESTIQUES

Le développement de la cuisinière à induction (voir Figure 4) n'a été rendu possible que grâce à la réalisation de convertisseurs de 3 kW utilisant l'énergie du réseau domestique 230 V – 50 Hz pour fournir un champ magnétique à 30 kHz qui chauffe directement la casserole par courants de Foucault.

² Si on avait exprimé les énergies en kJ et non pas en kWh, il y aurait eu moins de confusions.

³ Les convertisseurs peuvent avoir les fonctions suivantes : continu-continu – continu – alternatif et vice versa – fonction abaisseur ou élévateur de tension – changement de fréquence – adaptation aux moteurs – changement de fréquence – fonctionnement en source de tension ou en source de courant. Cela ouvre des perspectives considérables.



Les avantages apportés par ce système par rapport aux cuisinières à résistances conduisent à d'importantes économies d'énergie :

- 1 Le rendement du convertisseur délivrant directement l'énergie à la casserole par le champ magnétique est de 96 %.
- 2 Il n'y a pas, comme dans les cuisinières à résistance, une interface plaque casserole, dont l'état de surface se dégrade très vite. Cette interface freine le passage du flux de chaleur dont une partie se disperse, en pure perte dans l'atmosphère.
- 3 La réponse, aussi rapide que celle du gaz, permet non seulement de gagner du temps, mais évite de perdre de l'énergie due à l'inertie calorifique des systèmes à résistance.
- 4 Le réglage très étendu de la puissance permet une adaptation optimale à tous les types de cuisines.

Il en résulte par rapport à une cuisinière classique une réduction moyenne de la consommation d'électricité d'environ 40 %.

3.4. MOUVEMENTS

L'arrivée progressive du moteur électrique alimenté par un convertisseur a bouleversé l'exploitation des moteurs, particulièrement dans l'industrie. Alimenté par un convertisseur, le moteur électrique présente par rapport aux moteurs thermiques (essence et diesel) des avantages importants (voir Figure 5) :

- Il a aujourd'hui un excellent rendement : 95 % pour les moteurs de véhicules électriques et 98 % pour ceux des nouveaux TGV (70% pour les petits moteurs), et ce rendement varie peu avec la vitesse.
- Le moteur électrique ainsi alimenté est réglable et réversible, c'est-à-dire capable de renvoyer en régime de récupération, l'énergie de la charge au réseau ; encore une source d'économies d'énergie.

Les applications en sont extrêmement nombreuses : vitesse variable, asservissements de position, traction, véhicules électriques, et propulsion navale, etc.

MOTEURS THERMIQUES	MOTEURS ÉLECTRIQUES
Rendement limité par le principe de CARNOT à 20/ 30 %.	Rendement 60 à 98 % (TGV)
Emission de gaz à effet de serre dus aux combustibles fossiles : imbrulés et particules fines.	Gamme : du micromoteur à 50 MW, de 50.000 tr/min au moteur couple. Souplesse – Contrôle aisé. Temps de réponse du couple < 0,2 s.
Manque de souplesse. Nécessite souvent une boîte de vitesse et un embrayage. Gamme de puissance et de vitesse limitée.	La réversibilité permet de récupérer l'énergie potentielle de la charge et de freiner.
Pas de réversibilité.	Pas de pertes
La complexité du moteur demande un entretien régulier.	Excellente fiabilité et entretien très réduit.

Une étude allemande a montré que les moteurs consommaient, il y a une vingtaine d'années, 60 % de la consommation totale de l'électricité dans l'industrie en Europe. Aujourd'hui, les performances des ensembles moteurs-convertisseurs, remplaçant les machines périmées, ont conduit à une très forte réduction de la consommation d'énergie totale en Europe – aspect inconnu des médias – difficile à estimer mais représentant une fraction non négligeable de la consommation d'électricité dans l'industrie.

Figure 5 : Le moteur électrique, aujourd'hui alimenté par un convertisseur, apporte beaucoup, en facilité d'utilisation, et considérablement en rendement.

3.5. LA VOITURE HYBRIDE

Cet exemple est intéressant.

Le moteur thermique (essence ou diesel), encore indispensable pour les transports, possède entre autre inconvénient de varier beaucoup avec les conditions d'utilisation (voir Figure 6).

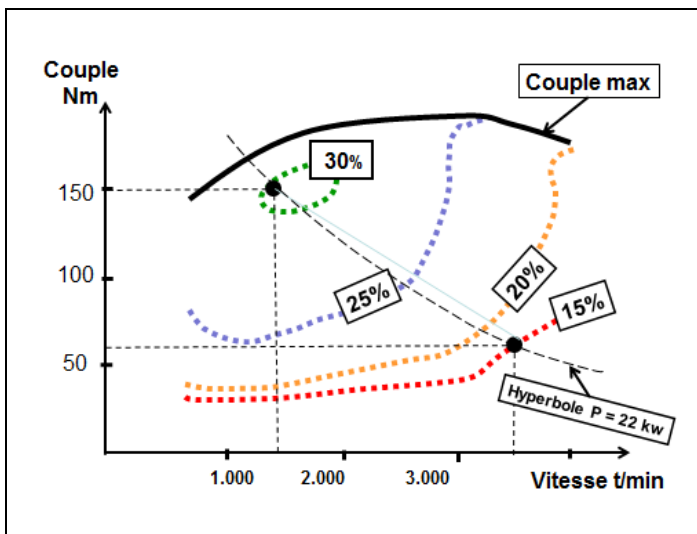


Figure 6 : Caractéristique couple vitesse d'un moteur thermique de 63 kW (85 CV). En pointillés les courbes à rendement constant

Exemple : Sur une route plate le moteur tourne à 3.500 t/min avec un couple résistant de 60 Nm : la puissance est de 22 kW et le point de fonctionnement se trouve sur la courbe de rendement 15 %. En tournant moins à 1.400 t/min avec un couple de 150 Nm, la puissance est toujours de 22 kW, mais on se trouve sur la courbe de rendement 30 %. Ce changement conduit, dans ce cas, à doubler le rendement du moteur.

Un gain non négligeable.

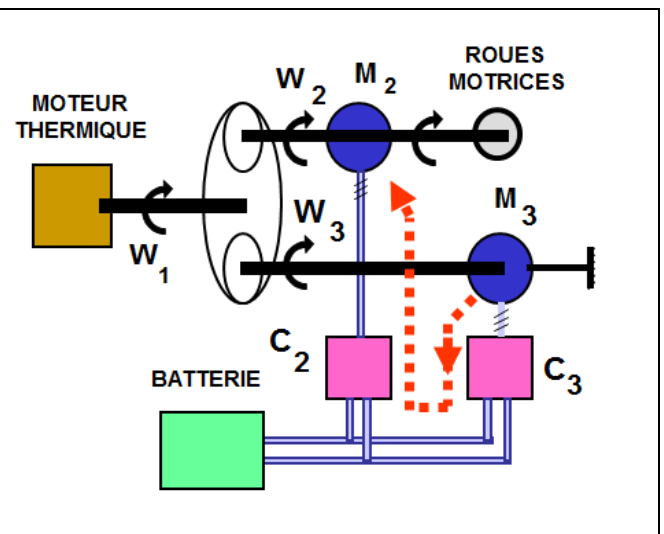


Figure 7 : La chaîne hybride « PRIUS ». Le contrôle du transfert d'énergie, dans les deux sens entre les machines M2 et M3 se fait par l'intermédiaire des convertisseurs C2 et C3 et permet d'avoir une transmission à rapport variable entre le moteur thermique et les roues

En régime permanent, toute l'énergie envoyée aux roues provient du moteur thermique. Les machines électriques n'apportent, ni ne récupèrent, aucune énergie, mais en échangeant par l'intermédiaire des convertisseurs permettent cette fonction de variation continue et réglable du rapport de transmission entre le moteur thermique et les roues. L'algorithme de contrôle optimise ce rapport pour minimiser la consommation.

Que faire pour diminuer la consommation ?

Mais en s'adaptant à la situation avec le moteur existant ; c'est-à-dire changer les conditions de fonctionnement pour que le moteur thermique fonctionne, quelle que soit la charge (vitesse – couple), dans des conditions de rendement optimales, on obtiendra un gain.

L'électronique de puissance permet de réaliser une transmission capable de faire varier rapidement et sans discontinuité ce rapport de transmission, et cela avec un excellent rendement. Un algorithme adapté contrôle l'ensemble pour que le moteur fonctionne toujours, quelle que soit la vitesse, la pente, et l'accélération, le plus près possible de son rendement maximal (voir Figure 7).

Qu'apporte l'électricité à ce système dont l'énergie provient toujours du moteur à essence ? Le choix de la vitesse du moteur, quel que soit celui des roues pour être toujours au régime de rendement optimal. C'est là le progrès essentiel qui permet au véhicule hybride de moins consommer – 20 à 30 %) sur un parcours varié. Il y a d'autres avantages (récupération de l'énergie potentielle – sous dimensionnement du moteur, suppression de l'embrayage).

La démarche est intéressante : on ne pouvait plus gagner sur le rendement maximal du moteur thermique limité par les lois de la physique. Repenser la solution par l'électricité a permis cette avancée, rendement moyen amélioré de 25 %, ce qui est aujourd'hui impossible avec un moteur classique, sans compter d'autres avantages (ni embrayage ni boîte de vitesse – récupération de l'énergie cinétique).

3.6. PROPULSION NAVALE HYBRIDE

On ne sait pas aujourd'hui, en dehors des combustibles fossiles, stocker sur un navire l'énergie nécessaire à sa propulsion. A priori, rien ne justifierait une propulsion électrique.

Or les différents avantages de cette propulsion (consommation aux vitesses réduites – manœuvrabilité) par des blocs moteurs indépendants), de plus en plus de paquebots, et même de chalutiers sont construits avec une transmission électrique.

Figure 8 : Les paquebots modernes utilisent de plus la formule hybride (Alstom).

3.7. CHAUFFAGE DOMESTIQUE

L'utilisation de la pompe à chaleur a été une véritable révolution dans les méthodes de chauffage. Voilà un équipement (voir Figure 9) qui fournit en énergie plus que ce qu'on lui a fourni en énergie électrique. Le rendement serait bien supérieur à 1 ? Non, la pompe à chaleur obéit comme toutes les machines thermiques au principe de CARNOT. Si elle fournit, à partir de la source d'énergie électrique, de l'énergie sous forme de chaleur dans le local à chauffer, il faut rajouter à cette énergie celle qu'elle puise dans l'environnement par un radiateur extérieur.

Elle fournit ainsi à l'utilisateur plus d'énergie qu'il n'en consomme. Le coefficient de performance COP, rapport entre l'énergie thermique fournie et l'électricité absorbée, en définit les caractéristiques. Le chauffage par pompe à chaleur a été long à s'installer en France, la fiabilité des premiers modèles n'était pas toujours au rendez-vous. Aujourd'hui ce matériel est fabriqué en série. Les convertisseurs des moteurs des compresseurs ont bénéficié de tous les progrès de l'intégration des composants de puissance.

Grace à l'utilisation de l'électricité, on a pu développer la pompe à chaleur qui fournit plus d'énergie thermique qu'elle ne consomme d'énergie électrique. C'est une propriété extrêmement rare dans la nature, une performance qu'il convient de souligner ! Avec un COP de 3, valeur courante dans les équipements modernes l'utilisateur reçoit, en énergie thermique, 3 fois plus qu'il ne consomme en électricité.

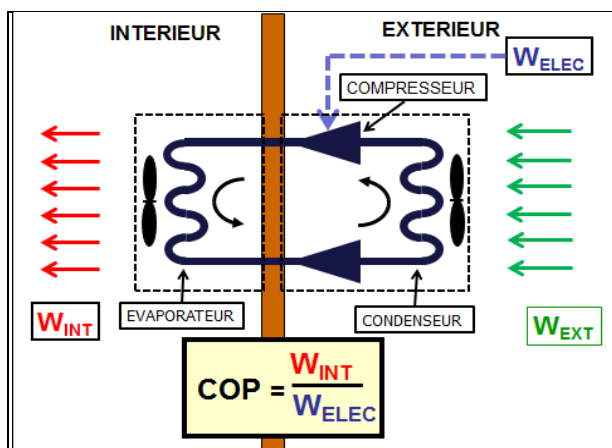


Figure 9 : Exemple d'équipement de chauffage par pompe à chaleur air-air (climatiseur)

L'unité extérieure extrait une énergie E_{EXT} de l'air extérieur – ce qui se traduit par un refroidissement de l'atmosphère extérieure – et envoie par un système de compression, analogue à celui d'un réfrigérateur, cette énergie E_{INT} sous forme d'air chaud à l'intérieur du local à chauffer. Puis le gaz est détendu et retrouve sa forme liquide dans le condenseur (à droite). On consomme pour alimenter le moteur du compresseur une énergie électrique W_{ELEC} prise sur le réseau domestique 230V 50Hz.

L'utilisateur s'intéresse à ce qu'il reçoit, c'est-à-dire l'énergie thermique W_{INT} et à ce qu'il doit dépenser, l'énergie électrique W_{ELEC} . On définit un coefficient de performance COP.

$$COP = W_{INT}/W_{ELEC}$$



En plus, la pompe à chaleur n'émet localement pas de CO_2 , et pas de pollution atmosphérique. Dans la pratique on a soit des équipements individuels - souvent appelés « climatiseur » air-air, soit des ensemble complets utilisant généralement une source extérieure enterrée. Quelle que soit sa forme, la pompe à chaleur, va jouer dans le futur un rôle essentiel par une très forte réduction de l'énergie utilisée pour le chauffage (voir Figure 10).

SYSTÈME DE CHAUFFAGE	Emission de CO_2 (g/kWh)	Emissions locales	Efficacité Energétique
Gaz	220	Imbrulés	90%
Bois	54	Particules imbrulés et Produits cancérigènes	60-85%
Granulés	60	Faibles émissions	70-90%
ELEC Résistance	90 à 180	Pas d'émissions	100%
ELEC Pompe à chaleur	30 à 60	Pas d'émissions	300% COP = 3

Figure 10 : Principales caractéristiques des équipements de chauffage domestique. La pompe à chaleur présente de très nombreux avantages :

D'abord très faible consommation d'énergie. Ensuite pas de pollution locale, pas de manutention, pas de combustible à stocker, réglage rapide, Eléments valables dans le contexte français.

3.8. LE CANON ÉLECTRIQUE

Cette application est intéressante car elle concerne un domaine où, en changeant de procédé, on franchit une limite. Augmenter la vitesse de sortie du projectile est un objectif fondamental pour en réduire le poids et en améliorer la portée et la précision. Mais on tombe avec la solution classique du canon à poudre sur une limite due à une grandeur physique ; la vitesse de propagation de l'explosion qui limite celle du projectile à 1.000 m/s.

Si on dispose de suffisamment de puissance, en le propulsant par une force électrique, cette limite n'existe plus. Le canon électrique a été longtemps un rêve. L'arrivée des composants semi-conducteurs de grande puissance thyristors GTO, IGCT a permis en déchargeant des condensateurs à la microseconde près sur toute la longueur de parcours du projectile d'obtenir un très haut niveau de courants impulsions, qui créent la force propulsive.

Les puissances mise en jeu dépassent les centaines de MW. Aujourd'hui on atteint des vitesses de 2000 à 3000 m/s et plus tard le double. Les limites se trouvent aujourd'hui dans la résistance à la rupture et à la tenue en température des rails de guidage qui subissent des efforts énormes (voir Figure 11).

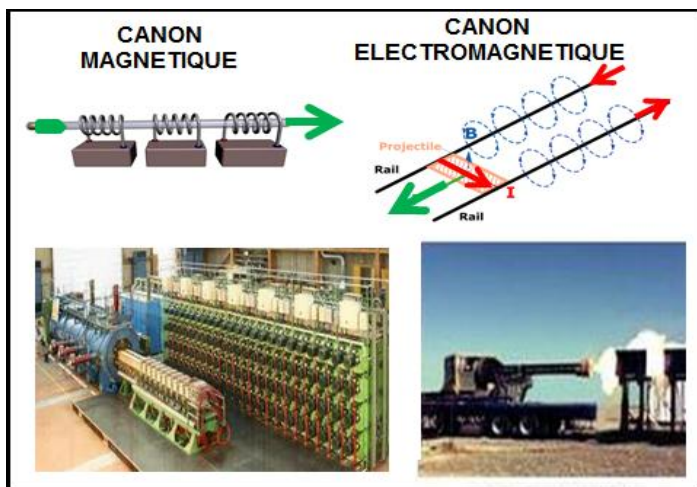


Figure 11 : Deux solutions pour le canon électrique. En bas un prototype de laboratoire et un essai sur un prototype plus avancé.

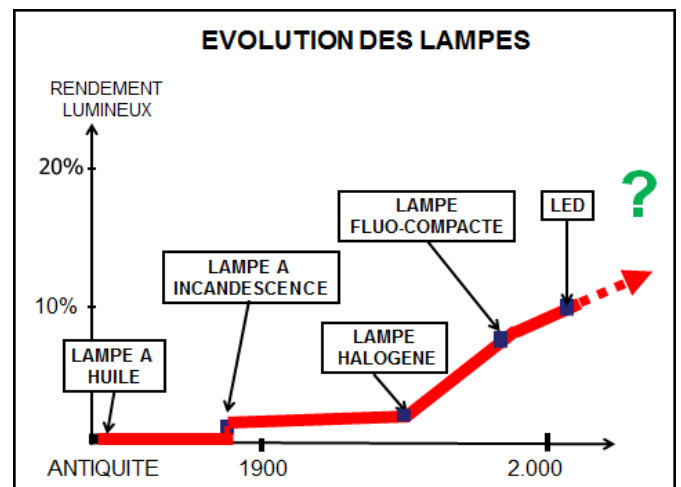


Figure 12 : Progrès dans le rendement des sources lumineuses.

3.9. LES SOURCES LUMINEUSES

Le rendement des sources lumineuses a fait de grands progrès (voir Figure 12). Les lampes à incandescence ont été remplacées par les lampes compactes fluorescentes qui consomment 4 à 5 fois moins d'énergie.

En estimant qu'en France la consommation électrique pour la lumière était de 4 % de la consommation totale, avec les lampes à incandescence, leur remplacement par des lampes fluo-compactes permettra de réduire la consommation totale française d'environ 1,5 %⁴.

3.10. UN AUTRE EXEMPLE D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

La séparation isotopique de l'uranium, a été réalisée dans l'usine de Pierrelatte, fonctionnant par diffusion gazeuse. Ce procédé très gourmand en énergie consommait l'énergie produite par deux tranches nucléaires. La nouvelle usine « George Besse 2 » qui utilise pour la séparation un procédé différent, la centrifugation (machines électriques à grande vitesse), consomme 50 fois moins d'énergie. L'économie d'énergie annuelle ainsi réalisée se situe aux environs de 12 TWh⁵ soit 2,7 % de la consommation française.

3.11. LES PROGRÈS DE LA FILIÈRE ÉLECTRIQUE

- Augmenter, souvent de façon très importante, le rendement d'applications existantes réalisées avec d'autres technologies
- Créer de nouvelles applications ou en transformer complètement certaines en apportant de nouvelles possibilités

C'est un chemin ouvert vers le « tout électrique ».

⁴ Une fois et demi la production annuelle photovoltaïque de 2013.

⁵ A peu près la production annuelle éolienne en 2012.

4. LE POINT FAIBLE : LE STOCKAGE

C'est la difficulté essentielle qui handicape la filière électrique : **Nous ne savons pas stocker l'électricité dans des conditions acceptables**. A titre d'exemple, l'humanité n'a pu se développer que lorsqu'elle a su stocker sa nourriture. L'électricité ne se stocke qu'en très faibles quantités dans des condensateurs ou inductances. La seule solution existant aujourd'hui pour la stocker consiste à transformer l'énergie électrique en une énergie d'une autre nature, qui elle se stocke, puis par une transformation inverse revenir à l'électricité. Il existe deux méthodes principales (*autres méthodes en annexe*).

4.1. LES STEP

Stations de Transfert d'Energie par Pompage, utilisant l'énergie potentielle de l'eau stockée. C'est la seule méthode actuellement valable pour les réseaux électriques. Le coût de cette solution dépend du coût de réalisation des bassins.

4.2. LES ACCUMULATEURS

Des progrès notables ont été effectués depuis une dizaine d'années (lithium) permettant par exemple le démarrage du véhicule entièrement électrique. Aujourd'hui, les accumulateurs ont encore trois limites principales :

- le prix élevé 3 à 500 €/kWh⁶
- une faible capacité de stockage 0,1 à 0,18 kWh/kg
- une durée de vie limitée : 500 à 2.000 cycles suivant les conditions d'utilisation⁷.

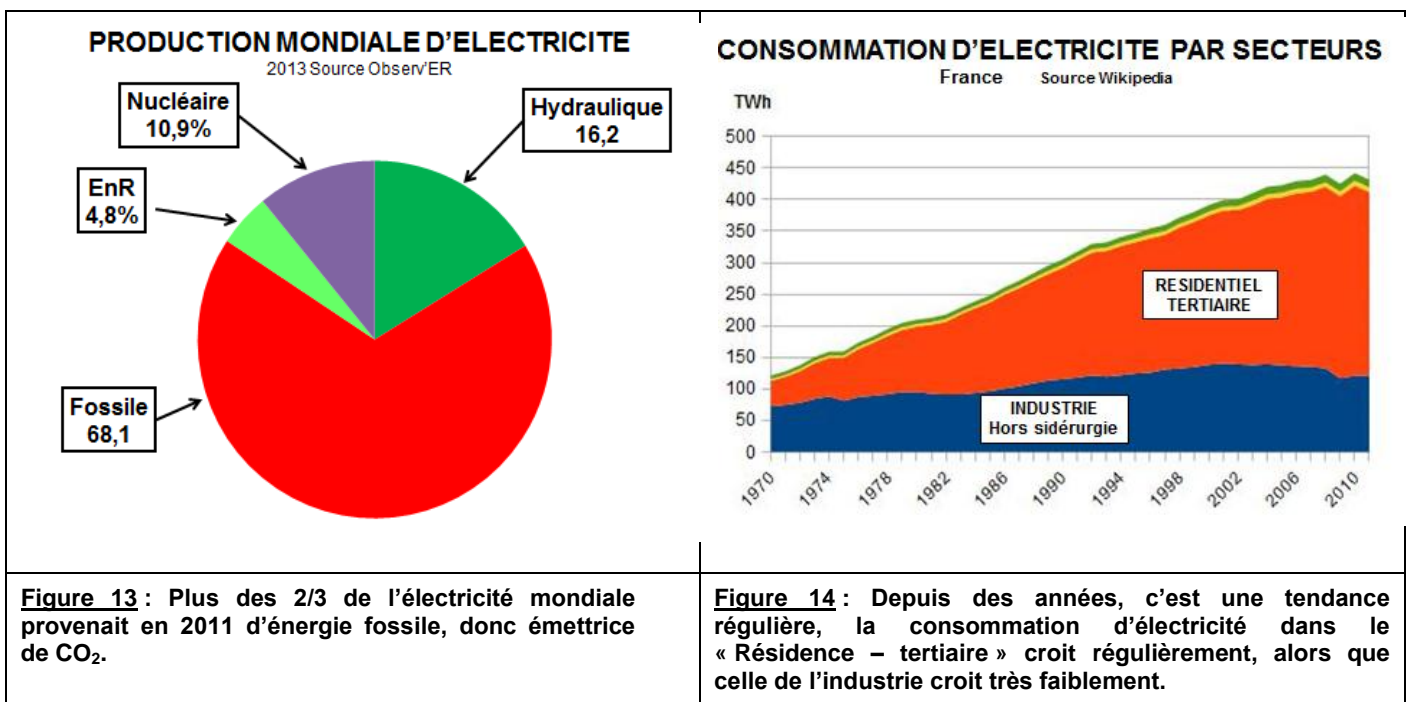
Des améliorations sont attendues avec d'autres types d'accumulateurs. Dans les meilleures conditions on pourrait s'attendre dans une vingtaine d'années à un doublement de la capacité de stockage.

Le stockage de l'électricité est et restera une solution coûteuse.

5. PRODUCTION ET CONSOMMATION

5.1. PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ

Aujourd'hui (voir Figure 13) près des 2/3 de l'électricité produite dans le monde est fournie par des combustibles carbonés, majoritairement du charbon dont les réserves sont très importantes. C'est une très forte source d'émissions de CO₂, et en plus l'origine de polluants nuisibles.



⁶ Les prix donnés dans ce document sont des prix industriels, valables pour des quantités.

⁷ Pour une voiture citadine, aujourd'hui, le coût de la batterie est voisin de 8.000 euros et son poids de 200 kg.

5.2. ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Elle est soumise à deux tendances contraires :

- Une augmentation due à l'arrivée de nouveaux produits, et le comportement de la population qui pousse à l'acquisition de ces produits
- Une diminution due aux économies d'énergie obtenue par l'amélioration des rendements

Dans les pays riches ces deux tendances tendent à s'équilibrer la consommation totale d'électricité continuera à y augmenter faiblement (+0,50 à 1 % hors crise). Il est essentiel de remarquer que dans ces pays riches la consommation véritable augmente aujourd'hui beaucoup plus que ce que montrent les statistiques, mais que cette augmentation de consommation est cachée par les économies d'énergie réalisées grâce à l'efficacité énergétique.

La figure 14 le montre d'une autre façon. En 1970, l'industrie (hors sidérurgie) consommait environ la moitié de l'électricité consommée en France à égalité avec le « résidentiel-tertiaire ». En 2011 (voir Figure 14), la situation est complètement changée, le résidentiel-tertiaire consomme maintenant environ les $\frac{3}{4}$ de l'électricité utilisée en France⁸. Cette remarque est particulièrement importante : elle montre que ce n'est plus l'industrie qui pousse la consommation, mais le particulier qui représente le secteur « résidence-tertiaire ». Il est nécessaire aujourd'hui de tordre le cou à l'image symbolique des médias qui représentent toujours une usine quand on mentionne les émissions de CO₂.

L'industrie est très motivée par les résultats financiers. Quand le coût de l'énergie augmente, elle a les spécialistes capables de penser des campagnes de réductions de consommation. Le particulier n'a pas, sauf exception, ces moyens. Dans les pays émergents, la consommation d'électricité augmente beaucoup plus (+3 % par an) car pour ces pays la priorité actuelle est d'accéder à un autre niveau de vie. Ce n'est que plus tard qu'ils prendront les mesures d'efficacité énergétique. Cette augmentation de 3 % est une grave menace car cette production carbonée aux 2/3 va continuer à augmenter fortement les émissions de CO₂.

6. LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

La situation de notre climat est aujourd'hui sans équivoque. Ce sont les émissions de gaz à effet de serre de nos grands-parents qui agissent aujourd'hui. Dans deux générations ce seront les nôtres qui conduiront à un réchauffement climatique bien supérieur « *C'est aujourd'hui⁹ la dernière occasion pour limiter le réchauffement à 2°C en réduisant drastiquement les émissions de CO₂ de 40 à 70 % en 2050 et en visant des émissions quasi nulles en 2100* ».

Nous sommes en face du problème majeur de l'énergie dans le monde

Quels sont les moyens dont nous disposons aujourd'hui pour limiter ces émissions de CO₂ dues à la production d'électricité ?

1. **Les énergies renouvelables EnR**
2. **L'efficacité énergétique**
3. **Un changement de comportement**
4. **Les sources non carbonées**

7. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES (EnR)

Ayant les avantages d'être inépuisables, de ne pas émettre de CO₂, les EnR représenteront un sujet important pour le futur.

7.1. FACTEUR DE CHARGE

Dans la pratique il n'existe pas de production d'électricité qui fonctionnent en permanence. Le facteur de charge qui caractérise l'intermittence s'obtient en divisant la quantité d'énergie annuelle, fournie par l'équipement, par la quantité qu'aurait fourni cet équipement s'il avait fonctionné à sa puissance nominale pendant un an. C'est le rapport :

$$F = \frac{\text{Puissance moyenne annuelle}}{\text{Puissance nominale}}$$

⁸ Remplacer des consommations de base de l'industrie plus faciles à contrôler que celle plus fluctuante des ménages n'est pas sans poser des problèmes aux réseaux. La pointe de grands froids augmente plus vite que la consommation et a atteint 100 GW en février 2012.

⁹ Rapport du GIEC 02/11/2014. Les émissions ont augmenté ces deux dernières années beaucoup plus vite que les prévisions.

Les principales EnR (solaire, éoliennes, marées, houle, hydraulique au fil de l'eau) sont marquées par des intermittences importantes qui dépendent de la nature (été – hiver – nuit – anticyclones – météo) intermittences sur lesquelles l'homme ne peut avoir de l'influence. Les intermittences des autres énergies, surtout des arrêts d'entretien, sont très réduites, et surtout elles peuvent être programmées en fonction de la demande (voir figure 15).

Elles vont demander des choix et donc des priorités, et devraient toujours faire l'objet d'analyses coûts-bénéfices pas faciles à réaliser, et de mesures in-situ avant et après les travaux.

Compensation de l'intermittence

Pour assurer une livraison permanente avec un équipement intermittent il faut y associer :

- soit un équipement de stockage généralement de puissance voisine et de capacité proportionnelle aux durées des arrêts.
- soit un autre équipement de production ayant lui aussi une puissance voisine.

Dans la réalité la situation se complique du fait que la consommation est aussi intermittente avec, en hiver, une pointe le soir et une consommation plus élevée.

Compensation par du stockage

En France les STEP sont capables de compenser environ 20% des besoins. C'est la seule solution capable de répondre très rapidement à une demande soudaine.

Le coût des accumulateurs (300 à 600 €/kWh) est tel qu'à de rares exceptions près (îles ou régions très isolées), ils ne sont pas utilisés pour les réseaux électriques.

Compensation par l'électronucléaire

Une très grande partie des variations, notamment saisonnières, est absorbée par l'électronucléaire qui programme ses révisions en période de faible consommation.

Compensation par des centrales à combustible fossiles

La législation impose d'utiliser en priorité les EnR. Certaines centrales à combustible fossiles, devant fournir l'appoint pendant peu de temps, fonctionnent dans de mauvaises conditions de rendement. Avec comme conséquences :

- L'augmentation du coût de l'énergie dû à l'amortissement de la source d'appoint
- Des émissions supplémentaires de CO₂
- Une baisse du rendement
- Une augmentation de pollution de certaines de ces centrales qui, fonctionnant peu de temps n'ont pas le temps d'atteindre leur équilibre thermique¹⁰

Autres difficultés

Les EnR ne sont pas placées en fonction des besoins, mais en fonction de la nature. En Allemagne, par exemple, l'éolien produit dans le nord, et le solaire dans le sud. Il faut acheminer ces différentes énergies souvent loin, et l'Allemagne va être obligée d'installer sur de grandes distances de coûteux réseaux THT pour répartir la production. Elle y arrive très difficilement, devant le rejet par les populations des lignes THT.

7.2. L'HYDRAULIQUE

L'hydraulique est une technologie bien stabilisée qui a fait la fortune de la France pendant les trente glorieuses. En 2013, cette énergie a fourni 13,8 % de la production d'électricité française. Elle n'y progressera plus beaucoup, car la plupart des sites possibles ont été exploités et des oppositions pourraient empêcher les quelques extensions possibles. En 2012, l'hydraulique représentait 16,2 % de la production mondiale. C'est, et de très loin, la première source d'EnR. Elle permet un stockage de longue durée par les barrages.

7.3. LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

EQUIPEMENT DE PUISSANCE 1000 MW	FACTEUR DE CHARGE (France)	ENERGIE ANNUELLE FOURNIE
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	13 %	1.140 GWh
ÉOLIENNE TERRESTRE	23 %	2.020 GWh
ÉOLIENNE EN MER	37 %	3.240 GWh
ÉLECTRO NUCLÉAIRE	80 %	7.000 GWh
CENTRALE AU CHARBON PERMANENTE	90 %	7.880 MWh

Figure 15 : Facteurs de charge. Caractériser les équipements de production par leur puissance « nominale » ne donne aucune information sur leur capacité à fournir de l'énergie. Ainsi une centrale photovoltaïque de 1000 MW fournira presque 6,6 fois moins d'énergie qu'une tranche électronucléaire de même puissance.

¹⁰ En Allemagne, on a été jusqu'à ne pas arrêter ces centrales et payer pour qu'un client en absorbe le courant quand il y avait trop d'EnR.

Ce type d'équipement est bien connu. Le rendement des panneaux est passé de 12 à 20 % et pour le futur on compte sur des diminutions de coût. Les panneaux photovoltaïques sont une solution très bien adaptée aux habitations isolées qui bénéficient d'un bon ensoleillement ; il faut assurer le stockage par des accumulateurs.

L'intermittence du solaire photovoltaïque. Il faut tenir compte :

- des variations journalières de la production
- des variations saisonnières
- de la météo

et ensuite s'adapter à la consommation (voir Figure 16) qui est importante le soir, et non négligeable la nuit.

Pendant l'hiver, le soleil fournit en moyenne trois fois moins d'énergie que pendant l'été. Or c'est pendant l'hiver que le besoin d'énergie est le plus fort, c'est donc dans ces cas qu'il est nécessaire de prévoir les centrales de remplacement qui seront inutilisées l'été et en demi-saison. L'énergie solaire est donc, dans nos régions, particulièrement handicapée par l'intermittence.

Le solaire photovoltaïque a fourni, en 2013, 0,8 % de la production électrique française, avec un facteur de charge de 13 %. Dans le monde, c'est 0,44 % de la production électrique mondiale en 2012. L'énergie solaire a, sur le plan mondial, un fort taux de croissance annuel.

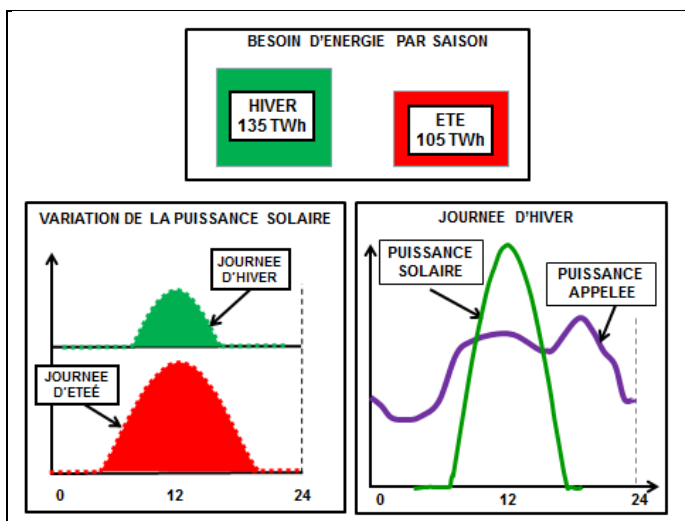


Figure 16 : La fourniture d'énergie au réseau demande, en plus des variations journalières, saisonnières hiver-été, et de la météo des capacités de remplacement importantes, flexibles et rapidement disponibles. Le solaire photovoltaïque est de ce côté très handicapé.

7.4. LES ÉOLIENNES

Les premières éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe, alors que la vitesse du vent est éminemment variable. Aujourd'hui les éoliennes modernes, qui utilisent toutes des convertisseurs, sont des machines très perfectionnées. Elles sont à vitesse et à pas variables, dans le but d'exploiter au maximum l'énergie du vent. Par le convertisseur associé, elles peuvent fournir ou absorber de l'énergie réactive pour faciliter leur insertion dans le réseau. Ce sont aujourd'hui des machines très perfectionnées et efficaces.

L'intermittence de l'énergie éolienne

Il y a en moyenne un peu plus d'énergie éolienne en hiver qu'en été, ce qui est favorable.

Figure 18 : Eolienne de 6 MW à entraînement direct

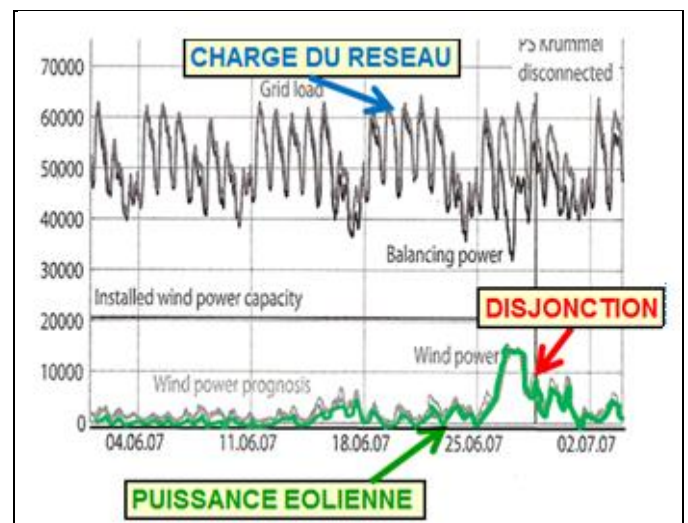


Figure 17 : Accident de Krümel en Allemagne.

Du 1 juin au 25 juin il y a un anticyclone sur l'Europe : la puissance délivrée par les éoliennes est très faible pendant presque un mois. Le 25 juin un front froid arrive rapidement, la puissance des éoliennes monte brusquement à 17.000 MW puis, comme la vitesse du vent continue à croître, la majorité des éoliennes s'arrêtent par sécurité quand la vitesse du vent dépasse 25 m/s. Le réseau en période de demande croissante, n'arrive plus à gérer ces variations, un transformateur surchargé est détérioré dans la centrale de Krümel, et le réseau local disjoncte.



Mais il y a aussi des arrêts de vent prolongés dus à des anticyclones stationnés sur l'Europe qui peuvent durer plusieurs semaines, et qui quelques fois se produisent pendant des périodes de grands froids au moment où le besoin d'énergie est maximal. Un cas difficile de l'intermittence est celui de l'arrivée brutale de vents forts. La majorité des éoliennes sont arrêtées par sécurité lorsque la vitesse du vent dépasse 25 m/s, ce qui risque dans certains cas de déstabiliser le réseau (voir Figure 18).

On trouvera une occasion supplémentaire de développement avec les parcs en mer où le vent est plus fort, régulier, et moins turbulent mais les installations très coûteuses. Le facteur de charge (terrestre) en France est de 23 %. En mer, le facteur de charge est plus élevé : 30 à 40 %. L'énergie éolienne a représenté en France 2,9 % de la production électrique en 2013, et 2,4 % de la production mondiale en 2012.

Partout l'énergie éolienne a un fort taux de croissance. Elle sera plus tard limitée dans certains pays par le nombre de sites disponibles. Par exemple, le gisement total de sites éoliens possibles en France ne pourrait couvrir que 25 % de la consommation française.

7.5. LES INSTALLATIONS MARÉE–MOTRICES

Ce type d'équipement est bien connu. Le barrage de la Rance (250 MW) construit dans les années 60, fonctionne maintenant de façon très satisfaisante. Il fournit 0,13 % de la production française. Ce type d'équipement ne sera pas reconduit à cause de son influence néfaste sur l'environnement et du coût du génie civil.

On s'oriente vers les hydroliennes, analogues aux éoliennes mais plus petites, car bénéficiant de la densité de l'eau 800 fois plus élevée que celle de l'air. Ce sont des machines immergées qui utilisent les courants de marée (voir Figure 19). Elles souffrent aussi d'intermittence, mais à la différence des énergies dépendantes du climat, ces intermittences, fonction des coefficients de la marée, sont réduites et prévisibles. Quelques sites, disponibles pour ces courants de marée, existent en France ; ils pourraient, bien exploités, couvrir environ 3 à 4 % de la production nationale d'électricité. Les sites sont limités dans l'ensemble du monde. La production en 2014, assurée par des prototypes, est encore négligeable.



Figure 19 : Prototype d'hydrolienne 1 MW.

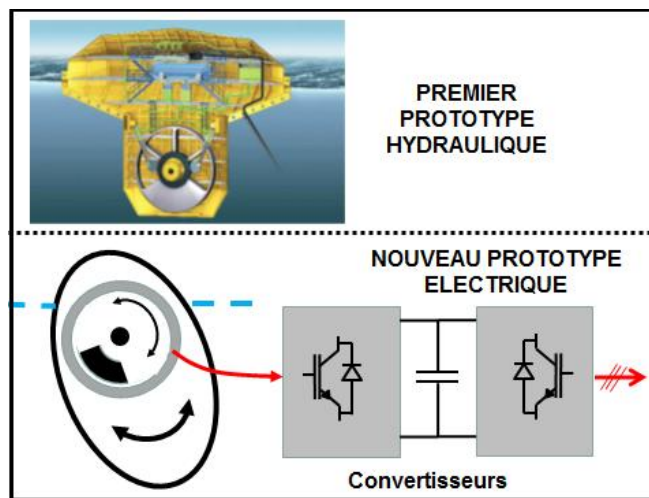


Figure 20 : Prototypes français SEAREV.

7.6. LES SYSTEMES UTILISANT L'ENERGIE DE LA HOULE

L'énergie de la houle est proportionnelle au carré de son amplitude. Chercher à capter cette énergie demande des solutions nouvelles. Il existe dans le monde de très nombreuses et différentes solutions toutes sont en phase d'expérimentation. Beaucoup ont été détruites dans les tempêtes.

L'exemple de la solution SEAREV actuellement développée en France conjointement par l'Ecole Centrale de Nantes et l'antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique est intéressant. C'est un flotteur amarré qui oscille par la force de la houle. Un volant avec une importante masse excentrée oscille en fonction du mouvement du flotteur et entraîne un générateur. La première étude avait prévu un système hydraulique pour transformer l'énergie de la houle en électricité. La nouvelle étude utilise un alternateur sur le même arbre que le volant (voir Figure 20). L'alternateur y est accouplé sans réducteur mécanique.

D'un côté, c'est un avantage, conception simplifiée du système mécanique, d'un autre côté, c'est un inconvénient, car il s'agit d'une machine à vitesse lente¹¹, donc lourde. Une conception nouvelle a permis de garder un poids

¹¹ La taille d'une machine électrique est à peu près proportionnelle à son couple nominal. Une machine à vitesse lente sera beaucoup plus volumineuse qu'une machine à vitesse élevée.

acceptable pour la machine. Celle-ci alimente un convertisseur avec des super-condensateurs pour assurer le filtrage qui permet l'adaptation à un réseau industriel 50 Hz.

Il est intéressant de remarquer dans le cas du SEAREV, comme dans celui de l'éolienne de la figure 17, que c'est un progrès dans le domaine électrique qui a permis de supprimer un train d'engrenage. Il s'ensuit une amélioration importante de fiabilité du système. C'est essentiel quand il s'agit d'équipements fonctionnant dans le milieu marin. L'énergie houlomotrice est encore au stade des prototypes, et demandera encore beaucoup de travail avant de devenir opérationnelle.

7.7. AUTRES ÉNERGIES THERMIQUE DES MERS ET OCÉANS

L'énergie thermique

NB : L'article étant consacré à l'électricité, on ne parle pas ici de géothermie à basse température. Les sources chaudes volcaniques sont exploitées pour faire tourner des turbo-alternateurs, comme à Bouillante (Guadeloupe).

On utilise la différence de température entre la surface de la mer (28°C) dans les régions tropicales et la température en grande profondeur (8°C°). C'est un gisement d'énergie considérable mais difficile à exploiter à cause du très faible rendement de Carnot. Cela demandera des débits très importants. L'énergie nécessaire pour pomper l'eau froide située à grande profondeur diminuera encore le rendement. Cela concerne essentiellement les pays tropicaux. C'est encore un rêve qui se réalisera plus tard. Un projet de 16 MW en Martinique est en cours d'étude.

L'énergie des courants constants

Aujourd'hui la technologie nécessaire n'existe pas. Des études sont en cours

7.8. SUBVENTIONS

Certaines de ces EnR sont, en France et en Allemagne, chaque année très fortement subventionnées. A titre d'exemple, la subvention accordées en France (CSPE) au photovoltaïque depuis 2004 s'élèvera en fin de l'année 2015 à 9 milliards d'euros, et elle continuera à augmenter de plus de 2 milliards par an ; cela pour un résultat très faible : un peu plus de 1% de la production française en 2015.

Parallèlement aucune industrie du solaire photovoltaïque n'a émergé en France, le matériel en a été importé. Jamais un projet en France n'a conduit à un pareil résultat ; subvention considérables, pour un résultat très faible : pas de création d'emploi ni d'exportations. A titre de comparaison, le cout total des études et recherches concernant l'énergie en France est de 2,5 milliards (P. Papon REE 2014), du même ordre que la subvention de 2,25 Md € en 2015 pour le solaire photovoltaïque. La grande majorité des études concernant l'énergie sont, particulièrement en période de crise, les parents pauvres. On forme des thésards de haut niveau dans ces domaines ; ils ne trouvent du travail qu'à l'étranger. Il y a là un problème d'équilibre de la politique, qui préfère subventionner le court terme plutôt que d'investir pour l'avenir.

7.9. RÉSUMÉ : SITUATION DES EnR DANS LE MONDE

Les énergies renouvelable, qui, une fois amorties, ne créent pas d'émissions de CO₂ sont, et seront, des solutions indispensables à l'humanité. La première est de loin l'énergie hydraulique dont la croissance restera néanmoins lente dans les pays qui ne sont pas encore équipés, à cause des lourds investissements et des risques pour l'environnement qu'elle occasionne. Les EnR « phares » représentent très peu ; en France, en 2013, 2,9 % pour l'éolienne, 0,85 % pour le solaire. Elles vont augmenter, avec un fort taux de croissance, limité par le cout élevé entraîné par les intermittences qui est un handicap très important, et les possibilités géographiques. Par exemple, on ne pourrait pas dépasser en France 20 % à 25 % de la consommation, à cause du manque de place.

Les EnR seront-elles capables de remplacer les combustibles fossiles ?

Si la situation au niveau mondial est difficile à appréhender, il est plus facile d'analyser ce qui se passe en Allemagne, leader mondial incontesté en matière d'EnR, et pays disposant de statistiques et de prévisions sérieuses. Les émissions globales de CO₂ de l'Allemagne sont parmi les plus élevées d'Europe, pratiquement le double de celles de la France. Vont-elles décroître ? Non, les émissions de CO₂ de l'Allemagne augmentent aujourd'hui, + 2 % en 2013. Et pour le futur ? Les prévisions de la loi pour l'Energie « ENERGIEWENDE » montrent que les investissements en EnR, ayant été très forts ces dernières années, et n'ayant abouti que par des subventions à un coût très élevé¹², vont se réduire. La situation sera encore plus délicate après l'arrêt complet de l'électronucléaire, prévu en 2022.

¹² En Allemagne, le Vice Chancelier Sigmar Gabriel emploie l'expression de folie : « Je ne connais pas une autre économie capable de supporter une telle charge... ».

La conclusion est sévère pour le leader mondial des EnR ; il est, et sera très loin de réduire ses propres émissions de CO₂ par le seul développement des EnR. Pour la situation actuelle dans le monde, il y a une différence de taille en ce qui concerne l'évolution de la consommation mondiale d'électricité qui augmente sous l'influence aujourd'hui des pays émergents de 3,3 % / an. C'est bien plus qu'en Allemagne, et le développement des ENR dans le monde y est bien moindre qu'en Allemagne. La production mondiale restera donc très longtemps tributaire des combustibles fossiles comme le charbon.

Les EnR, malgré le développement des énergies éoliennes et solaires, aujourd'hui subventionnées, sont, et seront à elles seules, incapables de compenser les émissions de CO₂ dues à la production de l'électricité.

8. L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

C'est améliorer les rendements des principales utilisations de l'énergie (transformation – transports – chauffage - isolation) par la technique. Aujourd'hui les gains obtenus par l'efficacité énergétique sont importants. Remplacer des équipements classiques par des équipements électriques modernes (voir exemple § 3.10) a permis, augmenter considérablement les économies d'énergie. On peut le remarquer en observant en France la proportion de l'énergie consacrée à l'industrie : elle est passée de moitié en 1970 au quart aujourd'hui (en partie en raison de la désindustrialisation). Mais, une fois que l'on aura par les progrès terminé la chasse au gaspillage, que partout le procédé le plus économe aura été appliqué, il n'y aura plus grand chose à gagner.

Les mesures d'efficacité énergétique indispensables aujourd'hui, et très importantes, n'auront plus un grand rôle à jouer plus tard. C'est un point qui n'a pas encore été intégré dans les plans futurs.

9. LES SOURCES NON CARBONÉES

Aujourd'hui l'électronucléaire est, en dehors des EnR, la seule source importante¹³ disponible qui n'émette pas de CO₂. Il a représenté, en 2013, 11 % de la production électrique mondiale.

Comment va évoluer l'électronucléaire ces prochaines années ? Le nombre de réacteurs en projet nous montre la tendance (voir figure 21). Les pays riches en ont peu ; 38, par rapport aux 258 en service. Les pays riches avec un taux de +15 % ont fait passer le principe de précaution avant leur responsabilité de limiter les émissions de CO₂ qui concerneront leurs descendants.

Dans les pays émergents, la situation est différente. Il y a 118 réacteurs en projet, par rapport aux 202 en service. Ces pays évoluent vite avec un taux de croissance de l'électronucléaire de 58 %. Cela montre un chemin.

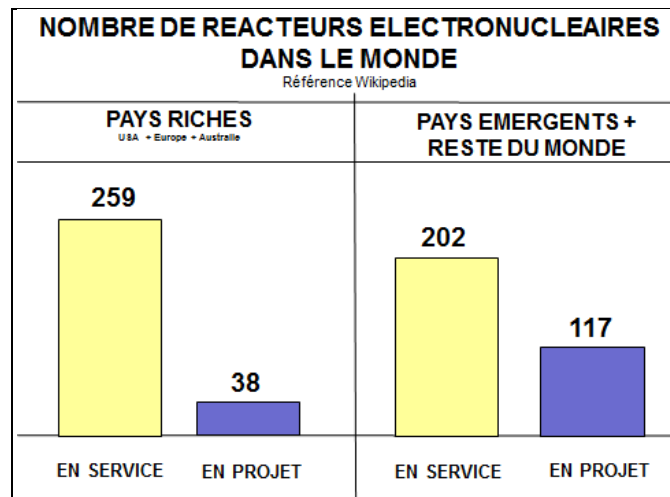


Figure 21 : Les projets de développement de l'électronucléaire

L'électronucléaire, la seule solution qui peut produire des quantités d'énergie importantes sans émissions de CO₂, a le potentiel de contenir les émissions de CO₂ à venir de la planète. Mais il ne peut être développé que dans des pays démocratiques, disposant d'une autorité de sûreté nucléaire compétente et indépendante, ainsi que d'exploitants formés à la sécurité.

10. LE CHANGEMENT DE COMPORTEMENT

L'efficacité énergétique résulte des actions techniques : isolation, augmentation des rendements, etc. Les changements de comportements, au contraire, sont le résultat de choix volontaires de l'homme ; réduire sa consommation pour protéger la planète, avoir une vie plus sobre pour protéger l'environnement.

Différents auteurs en ont traité sous le vocable de « sobriété heureuse ». Ce type de choix, proposé aujourd'hui par des prophètes isolés, conduiraient à une réduction de la consommation, donc du pouvoir d'achat. Il ne pourrait pas – dans le contexte actuel – être accepté par la majorité de la population.

¹³ La fusion est encore trop incertaine pour tabler dessus.

Pas un homme politique n'oserait actuellement le proposer. Actuellement l'effort est mis dans l'opinion publique surtout sur les solutions qui ne demande pas au consommateur de changer de comportement.

À priori, la situation parait bloquée. De quoi sera fait demain?

- La croissance peut-elle augmenter indéfiniment sans limite ?
- Où vont les émissions de CO₂ ?
- Peut-on gagner la guerre contre le réchauffement climatique avec des subventions ?
- Qu'est-il préférable pour l'humanité : Plus en qualité, ou plus en quantité ?
- L'addiction à l'électricité peut-elle menacer la société ?

11. AUJOURD'HUI ET DEMAIN

Faisons le point sur les différentes possibilités de réduire nos émissions de CO₂.

Les EnR

Au niveau mondial, les EnR, outils indispensables pour la préservation de l'environnement sont et seront, à elles seules, incapables de réduire de façon significative les émissions de CO₂ dues à la production croissante de l'électricité.

L'efficacité énergétique

Elle a beaucoup apporté, bien plus que les EnR, elle apporte encore beaucoup. Mais après un certain temps (Une générations ?), les progrès auront été effectués, elle n'aura plus grand-chose à apporter.

Donc dans le futur on ne pourra plus tenir compte de l'efficacité énergétique pour limiter la consommation

L'électronucléaire

L'électronucléaire seule solution qui a le potentiel nécessaire pour diminuer les émissions de CO₂ au niveau demandé par le GIEC, sera-t-il suffisamment mis en œuvre ? Les pays riches sauront-ils redresser la situation avant qu'il soit trop tard ? Les pays émergents y arriveront-ils avant qu'il ne soit trop tard ?

Le changement de comportement

Aujourd'hui, malgré les discours le monde n'est pas prêt de changer de comportement pour réduire de façon significative les émissions de CO₂, et nous allons droit vers un réchauffement de + 5°C. L'humanité n'évitera pas les premiers accidents climatiques, qui auront de lourdes conséquences, souvent irréversibles, particulièrement pour les pays du Sud.

L'histoire nous montre que l'humanité, placée dans une situation à priori inextricable, sait trouver des solutions « *Les problèmes qui nous préoccupent, écrit à ce sujet F. Roddier (Thermodynamique de l'évolution. Parole éditions) se résolvent par des prises de conscience collectives* ». Plus que les avertissements des climatologues ces graves accidents seront des signaux forts. Nous espérons qu'alors l'humanité se sentira alors vraiment concernée pour résoudre ses problèmes en changeant sa façon de consommer. Une partie de la situation étant irréversible, la route sera dure et longue, le résultat viendra lentement, il conduira à de fortes contraintes, mais l'espoir n'est pas perdu. Ce sera, non plus une politique de subventions individuelles, mais une œuvre collective qui concernera l'ensemble de l'humanité.

12. CONCLUSION

Il n'y a pas de solution parfaite ; notre responsabilité, c'est de laisser une planète vivable à nos descendants. Un philosophe du 20^{ième} siècle Marcel LEGAUT nous a appris à discerner dans la vie, et à s'engager sur des choix ;

- L'indispensable : Ce dont nous avons besoin immédiatement pour continuer à exister. Sans l'indispensable c'est la mort.
- L'essentiel : Ce dont nous avons besoin pour garder un sens à la vie. Sans l'essentiel la société se dégradera.

L'INDISPENSABLE : C'est éviter une aggravation du réchauffement climatique pour nos descendants. C'est donc réduire le plus vite possible nos émissions de CO₂. L'électronucléaire qui seul en a le potentiel doit être développé en priorité.

L'ESSENTIEL : C'est un changement de notre façon de consommer qui permettra le « Vivre Ensemble » avec un meilleur environnement. Il dépendra de nos choix.

ANNEXE

Le stockage de l'électricité

1. Stockage hydraulique STEP

C'est actuellement la seule solution économique réellement utilisée pour stocker les quantités d'électricité impliquées dans les réseaux. Cette technologie a déjà été développée au cours des années 1925 (sur le site Lac Blanc et Lac Noir dans les Vosges). Elle ne peut être développée que lorsque le relief s'y prête, et certains pays comme le Danemark et les Pays Bas ne peuvent y avoir recours. Aujourd'hui, avec les turbines et alternateurs modernes, le rendement total atteint souvent 80 %. C'est une excellente solution, quand on dispose de lieux adaptés, mais dont le coût peut être élevé en fonction des travaux de génie civil à réaliser. Elle présente une durée de vie très supérieure à celle des accumulateurs. Il existe de nombreux sites pour faire du stockage journalier. Pour le stockage annuel (été – l'hiver) seuls conviennent des barrages avec une importante retenue.

2. Stockage par accumulateurs

Pour des quantités d'énergie moins importantes (moins de quelques MWh), on utilise les accumulateurs.

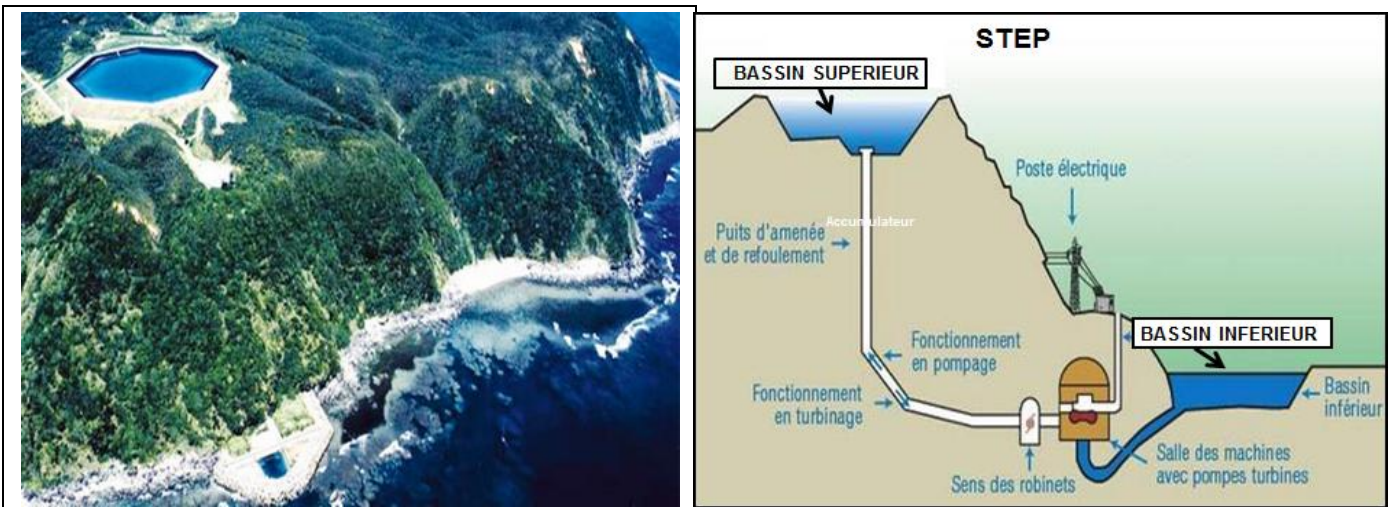


Figure 1A STEP, principe

La grandeur stockée est l'énergie potentielle de l'eau, pompée d'un bassin inférieur dans un bassin supérieur, par des groupes turboalternateurs réversibles alimentés par l'énergie électrique du réseau que l'on veut stocker.

Le déstockage se fera en faisant descendre l'eau stockée, qui en alimentant les groupes turboalternateurs fournira de l'électricité.

C'est un stockage chimique. Les accumulateurs au plomb (première technologie) ne sont plus utilisés pour la majorité des applications industrielles. Leur durée de vie est abrégée par la dégradation que leur font subir des décharges profondes, et leur capacité de stockage est faible ; < 0,03 kWh/kg. Cette technologie relativement économique reste utilisée pour des applications particulières comme l'automobile à moteur thermique, ou des systèmes de secours qui fonctionnent très rarement.

Grace à de nouvelles technologies : NiMh, sodium-soufre, il y a eu des améliorations 0,05 à 0,07 kWh/kg et avec le lithium, on a pu atteindre des capacités de stockage de 0,1 à 0,15 kWh/kg, ce qui a permis de nombreuses nouvelles applications depuis les systèmes portatifs jusqu'aux véhicules électriques. C'est un progrès, mais l'autonomie des véhicules électriques est, et restera encore longtemps, limitée par la capacité des accumulateurs, ce qui a conduit à un demi-succès de ces véhicules.

Les principaux points faibles du stockage chimique des technologies actuelles restent :

- La capacité massique encore très faible
- La faible possibilité de fournir des puissances instantanées importantes
- La durée de vie limitée des accumulateurs (entre quelques centaines et 3.000 décharges)
- Un coût qui est et restera longtemps élevé (NiMh # 250€ / kWh, Lithium 300 à 500 €/kWh)

Le futur est ouvert : si on ne voit pas aujourd'hui de saut technologique pour augmenter fortement la capacité des batteries, on verra des améliorations sur les accumulateurs actuels et de nouvelles possibilités. La capacité massique des batteries au lithium pourrait augmenter de 20 à 50 % et, plus tard, doubler avec d'autres types de batteries qui sont encore des sujets de recherche importants qui ne déboucheraient pas avant une dizaine d'années.

3. Les supers-condensateurs

Ils stockent réellement l'énergie électrique avec un rendement dépassant 96 à 98%, et sont capables de fournir des puissances instantanées très élevées avec une excellente fiabilité. Par contre leur capacité massique est très réduite : 0,05 kWh/kg. Ils sont, et seront, de plus en plus utilisés dans des applications industrielles, pour des phénomènes de courte durée.

4. Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel. Pour le produire il faut dépenser de l'énergie pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène. Pour les véhicules souvent cités, la chaîne de transformation est la suivante :

1. Production sans émissions de CO₂, aujourd'hui par électrolyse ; rendement de 80 % ; demain, il pourrait avoisiner 90 %.
2. Stockage. Pour conserver un volume raisonnable ; il faut stocker l'hydrogène sous forte pression (700 bars). 1 litre d'H₂ à 700 bars a un contenu énergétique équivalent à 0,35 litre d'essence.
3. Il y a d'importantes pertes d'énergie, à la compression ; de 20 à 30 % de l'énergie potentielle de l'hydrogène.
4. Transformation de l'hydrogène en électricité. C'est le domaine de la pile à combustible, dont le rendement pour les modèles mobiles est médiocre ; voisin de 50 %.

Au total, cela fait un rendement de stockage de l'hydrogène de l'ordre de 28 à 34 %, très inférieur aux rendements de stockage des batteries modernes (> 90 %). La voiture à hydrogène restera très handicapée par ce très faible rendement. Le stockage de l'électricité par l'intermédiaire de l'hydrogène sera toujours, à cause des conditions de rendement de transformation de cet élément, une solution conduisant à de faibles rendements, donc à un gaspillage d'énergie. Elle ne se développera que pour des applications particulières.

5. Autres méthodes de stockage de l'électricité

Des centrales stockant l'énergie électrique sous forme d'air comprimé ont été réalisées aux USA et en Allemagne. Le rendement réel en est médiocre : environ 40 %. Des études sont en cours pour réaliser la compression isotherme, ou son équivalent avec des échangeurs. C'est une solution qui pourrait déboucher plus tard. Des prototypes de petite puissance ont été réalisés à l'EPFL avec un rendement voisin de 60 %. D'autres solutions font parties d'importants programmes de recherche.

6. La recherche

Elle est très développée dans le monde surtout à cause du marché potentiel de la voiture électrique. On pourrait espérer des solutions tout à fait nouvelles les lois de la physique ne s'y opposeraient pas, mais aujourd'hui les limites de la technologie bloquent ces avancées. C'est l'inconnue du futur, mais sauf peut être avec l'air comprimé, on ne voit pas de réalisation à l'échelle des réseaux électrique avant au moins une génération, sinon bien plus.

7. Cas particulier des chauffe-eau

Il y a en France plusieurs millions de chauffe-eau qui sont programmés pour appeler l'énergie pendant les heures creuses de nuit. Ils apportent une contribution partielle puisque journalière, mais globalement importante à la régulation quotidienne de la demande, par stockage de l'eau chaude à usage domestique. Quand le marché aura réellement démarré, les voitures électriques rechargées la nuit pourront contribuer à réduire la pointe d'hiver. En attendant, les chauffe-eau thermodynamiques, selon le principe de la pompe à chaleur, permettent une importante économie d'électricité, en complément des chauffe-eau solaires.