

(Résumé, actualisé par l'auteur, de l'atelier de discussion qu'il a animé le 19 mai 2022 à l'Institut Cochin)

ÉNERGIE : QUOI DE NEUF ?

François ANDRAULT

Ingénieur IDN (Centrale Lille)

On en parle beaucoup : en consommer moins sauverait la planète, mais on en consomme toujours un peu plus ! On se réfère le plus souvent à l'électricité mais d'autres en parlent en équivalent pétrole !

L'énergie mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique pendant une certaine durée. Carnot nous enseigne que l'énergie ne peut se créer, ni se détruire : elle se conserve. De plus, la conversion d'une énergie en une autre, mécanique ou électrique, ne peut être complète : une partie est dégradée en chaleur, énergie désordonnée. Le rendement exprime le rapport entre l'énergie qui est perdue, dégradée en chaleur, et l'énergie utilisable.

Tout à fait à l'origine, l'énergie nous est fournie par des réactions de fusion dans le soleil, et aussi par des forces de gravitation.

On se propose d'étudier d'abord les nouveautés ou améliorations de l'utilisation de sources d'énergie, d'abord des énergies dites renouvelables, qui sont celles qui nous paraissent inépuisables et disponibles en grande quantité comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie.

Puis on passera en revue les progrès réalisés dans l'utilisation des énergies primaires non renouvelables, principalement d'origine fossile que sont le charbon, le pétrole et le gaz et la fission nucléaire.

Enfin la fusion nucléaire, est une autre source d'énergie non renouvelable, peu polluante très étudiée, mais encore sans résultat.

D'une manière générale, les recherches nous orientent vers des températures, des pressions et des volumes plus grands.

Par ailleurs, de progrès importants sont réalisés ou réalisables prochainement dans les moyens de transport et de stockage statique et mobile de l'énergie.

PRODUCTION DE L'ÉNERGIE

Énergies primaires

Les énergies primaires sont des formes d'énergie disponibles dans la nature avant toute transformation.

Énergie solaire



Fours solaires Ouarzazate (Haut Atlas marocain)

Les centrales solaires thermodynamiques sont composées de miroirs qui concentrent l'énergie en un faible volume. La montée en température ouvre des utilisations comme la désalinisation d'eau de mer ou la production d'hydrogène par thermolyse de l'eau (2500 °C) avec des rendements acceptables.

Cette forme d'utilisation de l'énergie solaire se développe, mais ne produit encore que 40 fois moins que le photovoltaïque : 150 GW contre 440 TW ; tous les pays s'y intéressent.

Géothermie horizontale

La géothermie horizontale consiste à utiliser la chaleur de surface de la terre chauffée par le soleil : des tuyaux sont enterrés à un mètre ou plus de profondeur. On y fait circuler de l'eau et une pompe à chaleur élève la température pour chauffer des locaux.

La géothermie horizontale est aussi utilisée pour stocker un excédent d'eau chaude produite par panneaux solaires de jour pour produire de l'électricité et/ou restituer cette chaleur la nuit pour le chauffage domestique.

Combustion du gaz naturel

On dispose de réserves considérables de gaz naturel. On propose la récupération de la chaleur de combustion en deux temps : une turbine à gaz semblable à un turboréacteur est couplée à un alternateur. Le gaz très chaud, en sortie, produit de la vapeur dirigée vers un turboalternateur classique. Le rendement atteint 60 % et le démarrage est possible en 30 minutes. Si la combustion du gaz naturel produit moins de CO² que celle du charbon, en revanche elle produit 20 fois plus d'oxyde de soufre et 4 fois plus d'oxyde d'azote.

Le gaz produit 20 % de la production mondiale d'électricité. Nous sommes en retard en Europe avec seulement 11 % : nous utilisons trop le charbon.



*Usine marémotrice Sihwa (Corée du Sud),
la plus puissante au monde 240 MW*



*DCN Brest Ile de Bréhat 4 turbines
2 500 foyers*

Énergie hydraulique

Étudiée en Corée du Sud, Sibérie, Écosse, l'énergie des mers ne progresse guère.

L'énergie produite par les fleuves atteint 16 % de la demande mondiale, soit 70 % de l'énergie renouvelable et ne cesse de croître. La Chine est championne dans ce domaine avec 19 barrages en construction ou projets. Des milliers de kilomètres de lignes très haute tension sont nécessaires.

L'énergie des barrages est mobilisable quasi instantanément, et facilement ajustable à la demande ce qui en fait un avantage considérable. Cependant la modification définitive de l'environnement et l'obligation de curage sont de graves inconvénients.

Géothermie verticale

On peut forer un puits et utiliser la nappe phréatique profonde en soutirant l'eau chaude ou forer deux puits procéder à une fracturation des roches, qui doit être entretenue, injecter de l'eau et la récupérer chaude. Actuellement la principale utilisation de la géothermie est le chauffage urbain.

En Islande la géothermie produit soit 20 TWh. L'excédent de production sert à la transformation de la bauxite canadienne en aluminium. L'eau chaude est prélevée à température élevée (150 °C) à 2200 m de profondeur.



Ile de Negros, Philippines, 220 MW

Les États Unis sont premiers producteurs d'électricité à partir de la géothermie verticale, puis les Philippines qui produisent 30 % de leur énergie électrique et l'Indonésie. Trois centrales sont en service au Kenya. Des turbines sont alimentées en vapeur et la chaleur de condensation peut servir au chauffage urbain.

En France 0,1 % de la production totale d'électricité en provient, mais des milliers de foyers en tirent leurs besoins de chauffage (Amiens).

Combustion du charbon

De petites centrales de production d'électricité par combustion du charbon sont construites à proximité des fermes d'éoliennes. Ces unités démarrent très vite, utilisent du charbon finement pulvérisé soufflé avec l'air de combustion finement ajusté.

Pour les grosses centrales, c'est la course aux températures et pressions élevées.

Les Allemands élèvent la température à 600 °C pour une pression de 250 bars (centrales supercritiques) et même 700 °C et 300 bars (centrales ultra critiques). La transition de phase eau/gaz est instantanée, sans ébullition. On arrive ainsi à des rendements de 47 % au lieu des 30 % classiques.

Une autre solution consiste à gazéifier le charbon : on chauffe le charbon avec de la vapeur d'eau pour obtenir un gaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. (1 000 °C). C'est une seconde usine à côté de la centrale électrique. Un surcoût très important pour gagner quelques points de rendement. Pour gagner encore, le Massachusetts Institute of Technology propose de combiner la gazéification du charbon aux technologies de pile à combustible. On atteindrait des rendements de 55 à 60 %, alignant ainsi les émissions du charbon sur celles du gaz. Le procédé utilise une membrane pour séparer l'hydrogène de l'oxygène. L'hydrogène est utilisé pour alimenter une pile afin de produire de l'électricité sans combustion. Résultat : les émissions de CO₂ et les cendres sont considérablement réduites.

La Chine produit ainsi 1,1 TWh soit la moitié de la production mondiale devant les États Unis et l'Inde.

Énergies secondaires

Énergie éolienne

Elle provient de l'énergie solaire et de la gravitation.

La puissance électrique mondiale des éoliennes installées dépasse les 40 TW. Le bilan écologique est grevé par le coût de la fixation au sol, la réhabilitation du sol en fin de vie et l'usure rapide des pales dont les composants sont irrécupérables.

La vitesse du vent doit être de l'ordre de 15 km/h et au maximum de 90 km/h.

Le dérèglement climatique réduit la vitesse moyenne des vents.

En France une éolienne ne tourne que 2000 heures par an. La réussite du Danemark ne s'entend que dans le cadre du réseau européen, Norvège et Suède sont ses principaux partenaires.

Si on la compare à l'énergie nucléaire, un EPR doit être remplacé par 2 250 éoliennes espacées d'au moins 150 m nécessitant 3 fois plus de béton et durant 3 fois moins longtemps.

Elles sont indispensables à cause du retard pris à renouveler et multiplier les centrales à fusion nucléaires.

On peut aussi chauffer les habitations en utilisant la chaleur de l'air en élevant la température d'un fluide caloporteur avec une pompe à chaleur. On compte 1 kWh électrique pour 3 kWh chaleur produits. Ce système se développe rapidement au niveau domestique.

Utilisation de la biomasse

D'importants progrès ont été réalisés dans l'utilisation de la biomasse. On produit un compost qui réduit la consommation d'engrais agricoles, et les petites unités de méthanisation produisent de l'électricité par fermentation de lisier, fumier, déchets ménagers, boues d'épuration, papiers & cartons, bois.

Le vaporeformage du méthane donne de l'hydrogène et du CO² et mieux le reformage à sec fait réagir CH₄ et CO² pour donner CO et H² excellent combustible.

D'autres digesteurs utilisant des algues produisent un combustible lourd équivalent au gaz oil.

Combustion du charbon

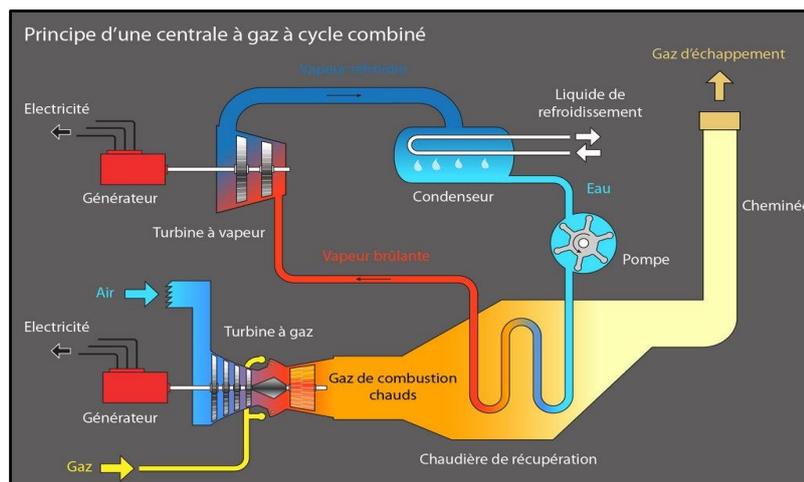


*Datteln 4 Rhénanie du Nord Westphalie
2.600 MW Rendement 42 %*

De petites centrales de production d'électricité par combustion du charbon ont été construites à proximité des fermes d'éoliennes. Ces unités démarrent très vite, utilisent du charbon finement pulvérisé, soufflé avec l'air de combustion finement ajusté.

Dans une **centrale supercritique ou ultra-supercritique**, l'eau est soumise à de très hautes températures sous très haute pression, ce qui lui permet de passer à l'état gazeux sans phase d'ébullition, ce qui améliore considérablement l'efficacité du système. Pour une centrale supercritique, l'eau est montée à 374 °C sous 221 bars.

Oxydation des gaz



Turbine à gaz à haut rendement suivie d'un échangeur évaporateur air/eau récupère la chaleur des gaz en sortie du turbo alternateur pour alimenter en vapeur un second turboalternateur

Le gaz naturel débarrassé de CO₂ et SH₂ parfois importants, est composé de méthane (95 %), d'éthane, de propane, de butane et de pentane gaz saturés en hydrogène. Les réserves sont considérables. Le gaz naturel produit 20 % de la production mondiale d'électricité.

Piles à hydrogène

Le procédé le plus courant de fabrication de l'hydrogène est le reformage du gaz naturel (méthane) par de la vapeur d'eau surchauffée. Malheureusement, cela produit du CO₂.

Un autre procédé est la gazéification du bois, composé principalement de carbone et d'eau. Brûlé dans un réacteur à très haute température (entre 1200 et 1500 °C), le bois libère des gaz qui, après reforming, donnent de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.

La production d'hydrogène par thermolyse de l'eau à très haute température (2500 °C) n'est rentable qu'avec l'énergie solaire.

Inventée en 1839, le développement de la pile à hydrogène a été freiné pendant un siècle par le coût très élevé des éléments qui la composent. Une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte bloque le passage des électrons et laisser passer les ions H⁺. Le platine est rare, polluant, très coûteux. Il est fixé sous forme de nano coquilles de quelques atomes sur une membrane en polymère baignant dans un électrolyte acide ou alcalin. La cathode (oxygène) est en argent et l'anode (hydrogène) en nickel plaqué chrome. Le rendement peut atteindre 60 % en laboratoire,

Comme le rendement des électrolyseurs ne dépasse pas 70 % et le rendement des piles ne dépasse pas 50 %, on ne peut donc atteindre globalement que 35 %.

Industrie du pétrole

Produit stratégique, il régit l'économie mondiale par son prix. Il préside à la définition d'une unité de mesure d'énergie :

$$1 \text{ t} = 1,2 \text{ m}^3 = 11,6 \text{ MWh} = 42 \text{ GJ} = 1 \text{ tonne équivalent pétrole ou 1 tep.}$$

En production globale d'énergie, il devance de peu le charbon 32 % contre 31 % et le gaz 21 %. On produit 100 millions de barils (159 l) par jour. Une première économie peut être réalisée par la récupération de gaz lors de la production, soit 140 milliards de mètres cubes et lors du transport et de l'exploitation, soit 11 milliards de mètres cubes.

92 % de l'énergie nécessaire aux transports est assurée par le pétrole, mais il sert aussi à produire des plastiques, des détergents, des engrais, des lubrifiants.

Réaction de fission nucléaire

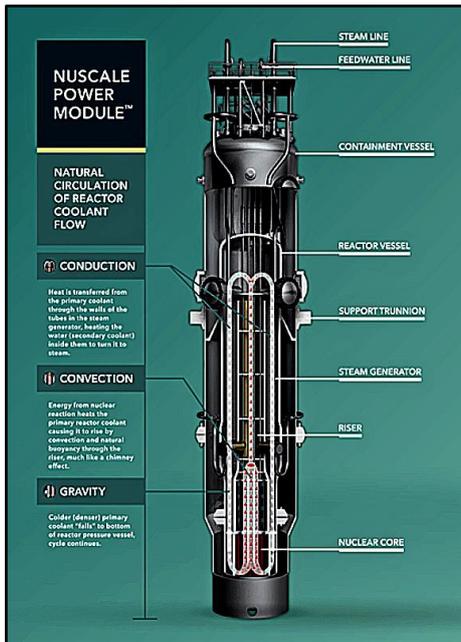
Les fissions induites les plus couramment utilisées sont les fissions de l'uranium 235, de l'uranium 238 et du plutonium 239. La part principale de l'énergie est constituée par l'énergie cinétique des deux atomes créés lors de la fission. Plusieurs neutrons rapides (2 ou 3) sont libérés et entretiennent les réactions.

Aujourd'hui, plus de 200 réacteurs nucléaires sont utilisés pour la recherche dans plus de 60 pays. En mars 2020, l'AIEA dénombre 53 réacteurs nucléaires électrogènes en construction dans 20 pays.

Réacteurs à eau pressurisée

<u>Trois EPR opérationnels :</u>	<u>Trois EPR en construction :</u>	<u>Quatorze EPR en projet :</u>
● Taishan 1 (<i>Chine</i> , 2018), record mondial	● Flamanville (<i>France</i>)	● Jaitapur (<i>Inde</i>) x 6
● Taishan 2 (<i>Chine</i> , 2019)	● Hinkley Point (<i>Royaume-Uni</i>) x2	● Sizewell (<i>Royaume-Uni</i>) x2
● Olkiluoto (<i>Finlande</i> , 2022)		● <i>France</i> x6

En projet au sein du Forum International Génération IV, un réacteur de puissance intermédiaire (150–600 MWe), refroidi au sodium, qui utiliserait comme élément combustible un alliage uranium-plutonium-actinide mineur-zirconium ; les éléments combustibles usagés seraient directement retraités dans des installations intégrées à la centrale.



Une variante de puissance plus importante (500–1,500 MWe) utiliserait un combustible MOX, le retraitement, fondé sur des procédés innovants en phase aqueuse, serait centralisé dans une usine desservant plusieurs réacteurs. La température de sortie du caloporteur serait de 510 à 550 degrés Celsius.

On sait construire de petites centrales de 150 ou 300 MW (15 m de haut et 3 m de diamètre) destinées au chauffage urbain, ou, immergées (100 m), pour la désalinisation de l'eau de mer.

La France hésite à se lancer dans la construction de 56 de ces petits réacteurs placés près des grandes villes afin de réduire les pertes de transport de l'électricité.

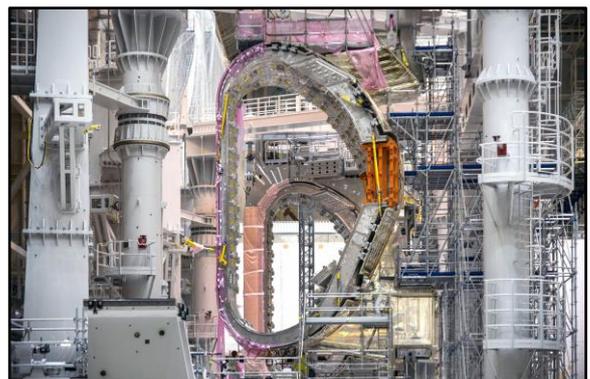
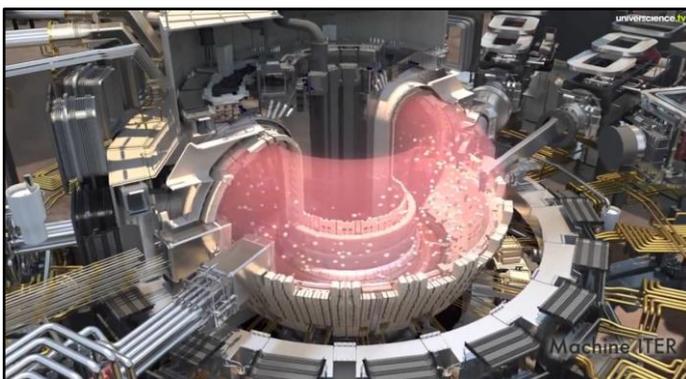
Le procédé ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*) utiliserait les énormes quantités d'U 238 et Pu 239 produites par les actuelles réactions de fission nucléaires et développerait la filière des réacteurs à neutrons rapides.

Réaction de fusion nucléaire

Les recherches portent principalement sur la fusion nucléaire qui assemble deux noyaux atomiques pour former un noyau plus lourd. Comme la masse du produit de fusion est inférieure à la somme des masses des noyaux fusionnés, la différence est transformée en énergie cinétique, puis en chaleur selon la formule d'Einstein $E = mc^2$. La fusion d'atomes d'hydrogène n'est pas à notre portée car elle nécessite trop d'énergie pour son amorçage. Nous tentons de fusionner des atomes de deutérium et de tritium qui donne du lithium 4. Cette réaction dégage une quantité d'énergie colossale par unité de masse. Le déchet principal est de l'hélium 4 qui n'est pas radioactif et les matériaux environnants qui, bombardés par les neutrons rapides, deviennent des isotopes radioactifs.

Le deutérium est, présent à l'état naturel en quantités importantes dans les océans, le tritium peut être produit par bombardement neutronique du lithium 6 en particulier dans les parois d'un réacteur de fusion nucléaire.

Sur terre, des températures de plusieurs centaines de millions de degrés sont nécessaires. Il faut créer un plasma de gaz et le maintenir dans un espace confiné. On utilise un tore dans lequel le plasma, très turbulent, est éloigné des parois munies de plaques de graphite, par de puissants champs électro magnétiques toroïdaux. Des conducteurs électriques en niobium-titane ou yttrium-baryum-oxyde de cuivre sont rendus supraconducteurs grâce à une usine annexe d'hélium liquide. Plusieurs méthodes de chauffage très complexes, sont utilisées pour initialiser la réaction, qui sera ensuite maintenue par la fusion. Les puissances nécessaires à l'allumage du plasma sont de l'ordre de celle d'une ville de 100 000 habitants.



Pendant la guerre froide, les États-Unis, l'URSS, l'Angleterre, la France, l'Allemagne et le Japon ont lancé des recherches isolément et en 1968, deux tokamaks russes stabilisent un plasma à plus de dix millions de degrés Celsius, mais pendant 20 millisecondes !

Le réacteur Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR), sur le site de l'Université de Princeton dans le New Jersey, a atteint une température de 510 millions de degrés en 1995.

Le record est actuellement détenu actuellement par JT-60U Japan avec une température de 520 millions de degrés.

Un autre record, détenu par la France en 2003 grâce au tokamak Tore Supra du CEA, est l'obtention d'un plasma stable pour la fusion pendant six minutes et demie.

Le réacteur de fusion HL-2M pourrait atteindre une température de 200 millions de degrés.

Le réacteur Tokamak Supraconducteur Avancé Expérimental chinois (EAST) a réussi à maintenir pendant plus de 100 secondes les conditions nécessaires au processus de fusion nucléaire avec une température de 100 millions de degrés.

ITER en construction en France pourrait atteindre 150 millions de degrés.

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

Énergie électrique

Le transport de l'énergie électrique est extrêmement coûteux : l'échauffement dû à l'effet joule contribue à 78 % des pertes. Comme il varie avec le carré de l'intensité, on élève la tension (et ensuite, il faudra la redescendre !) avec des transformateurs.

Au nombre de 800 000 en France ils sont responsables de 11 % des pertes.

En élevant la tension, on rencontre l'effet capacitif qui avec la conductibilité et l'ionisation de l'air contribue à 8 % des pertes. En haute tension, on est aussi obligé aussi de multiplier les câbles à cause de l'effet de peau.

En France on compte 100 000 km de câbles où la tension est entre 225 kV et 400 kV, et 1,3 million de km de moyenne et basse tension (90 k volts à 20 k volts). Il y a 26000 postes sources et 800 000 postes de distribution. Au total 10 % de l'énergie est perdue soit 2,5 % pour l'acheminement, 6 % pour la distribution et le reste en autoconsommation, fraudes et erreurs humaines soit 32 TWh/an ou encore une grosse centrale nucléaire en permanence (1200 MW) selon (RTE).

L'interconnexion des pays d'Europe continentale relie les différents générateurs et distributeurs avec une fréquence identique en courant triphasé. La production doit suivre la demande de très près ce qu'on ne sait pas encore faire et l'IA doit prochainement s'y atteler !

On améliore les conducteurs âme fer (bientôt fibre de carbone) entourée de fils en « Z » d'un alliage aluminium/magnésium/silicium de conductibilité proche de celle du cuivre. Malheureusement la température des câbles peut monter jusqu'à 200 °C.

Pour améliorer, on peut pour les distances supérieures à 600 km, monter la tension jusqu'à 1200 kV, mais au-delà, il faut envisager les ultra hautes tensions en courant continu.

En courant continu, on fonctionne de manière non synchrone avec le réseau. La Suède, l'Allemagne, l'Inde, la Russie utilisent de tels systèmes. Le Brésil est intéressé.

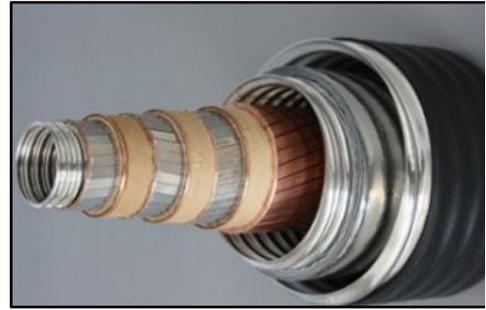
Entre la Mozambique et l'Afrique du Sud, une ligne arienne achemine 1,9 GW sur 1420 km

Mais les Chinois et les Japonais sont encore pionniers avec des tensions dépassant 1,2 GV. Le coût, par paire, de la transformation courant alternatif/courant continu et vice versa peut atteindre 1 milliard de dollars.

Maintenant, on envisage des supraconducteurs. On y transporte alors 130 fois plus d'électricité qu'avec une ligne conventionnelle.

On l'a envisagé pour traverser les Pyrénées et alimenter l'Espagne.

La société Nexans (États-Unis) exploite depuis mars 2008 les 600 m de câble supraconducteur (cuprates et azote liquide) véhiculant le plus de puissance au monde (600 MW).



La municipalité d'Essen, en Rhénanie, teste un câble supraconducteur sur 1 km.

En 2021, Nghai Vietnam, inaugure 1,2 km à 35 kV et 2 200 A, souterrain, refroidit à l'azote liquide.

Transport des combustibles fossiles

Il est extrêmement coûteux, que ce soit pour le charbon où des centaines de kilomètres séparent parfois le lieu d'extraction de la centrale, ou du pétrole transporté du puits de pétrole au moteur de voiture ou encore du gaz naturel liquéfié qui change de continent par bateaux méthaniers ou gazoducs. De 6 à 7 % du coût total, il peut atteindre 30 % de la facture !

Pour le pétrole, il peut atteindre 0,8 \$/tonne et par jour.

- Les méthaniers

Ils sont équipés de double coque et les cuves sont isolées au polyuréthane. Les évaporations alimentent les chaudières à gaz pour la propulsion.

- Les oléoducs

Ils sont le moyen de transport des combustibles le plus sécuritaire et écologique.

On compte plus de 500 000 km de gazoducs rien qu'aux États Unis.

Le plus long (4 000 km) Russie, Ukraine, Allemagne, Hongrie, Pologne, Allemagne est russe.

Les « pipes » sont de 25 à 30 cm de diamètre et le fluide y circule sous 130/150 bars, à une vitesse de 1 à 6 m/sec. Le coût de construction en moyenne à 4 000 €/m.

Le coût global de transport varie de 1 à 4 \$ par tonne aux 100 km.

Les gazoducs de transport acheminent de gaz déshydratés et désulfurés sous pression de 16 à 100 bars. Des stations de compression, espacées de 80 à 250 km rehaussent la pression et assurent sa progression (40 km/h) dans les canalisations.

Outre les dégradations et vols, on compte en moyenne 5 accidents ou fuites graves par an. On procède à la détection par plaquettes obturantes radioactives.

L'accident de Ghislenghiennois (30 juillet 2004) en Belgique fait 24 morts, 130 blessés, dont 33 sévèrement brûlés et 100 millions d'euros de dommages.

La consommation mondiale de gaz dépasse 500 milliards de m³

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Aussi essentiel que la production d'énergie solaire, pour toutes les productions d'énergie intermittente, le rendement du stockage de l'énergie se pose impérativement. Selon le cas à traiter, on dispose d'un grand choix de moyens.

Stockage mobile de l'énergie

On peut stocker de l'énergie en la transformant en énergie cinétique au moyen d'un volant d'inertie. Il est utilisé par toutes les voitures lors des changements de vitesse, pour éviter que la rotation du moteur ne descende immédiatement à une valeur inadéquate.

La récupération d'énergie freinage sur les voitures de course est utilisée depuis 2009. On gagne 55 kW pendant 7 s pour relancer la voiture.

Volvo expérimente le système FLYWHEELS KERS (*kinetic energy recovery system*) de récupération d'énergie cinétique avec un volant de 6 kg en fibre de carbone qui tourne à 60 000 tours/mn dans le vide. Il amènerait des économies de carburant de 25 % en ville.

PSA a récemment dévoilé son alternative basée sur la compression d'air dans des bonbonnes (70 % récupérés).

Toyota utilise la décharge d'un condensateur électrique pour lancer une voiture à l'arrêt. Il est rechargé pendant le déplacement.

L'utilisation d'accumulateurs électriques sur les véhicules se répand pour combattre la pollution dans les villes. Actuellement, il reste de nombreux problèmes à résoudre car globalement cette solution n'est pas écologique. Les études portent sur le rapport capacité/poids, la durée de la charge, le rendement, la durée de vie et surtout le coût (humain et financier) de production.

On sait déjà réaliser des accumulateurs beaucoup plus performants que le couple Li-Ion avec des anodes, des cathodes et des électrolytes différents : sodium-ion, silicium-metal, cathodes nickel-manganèse-cobalt, céramiques sodium-zirconium-phosphore, lithium-soufre, lithium dioxyde de carbone, oxyde de lithium-titane, oxyde de niobium-titane, électrolyte solide en polymère à nanostructures, etc. sont comparés.

- Oxydation de l'hydrogène

Production mondiale 0,6 Gt principalement par reformage de méthane avec de la vapeur d'eau 900 °C, 25 bars en présence d'un catalyseur, pour accroître le rendement.

Dans les fours solaires la thermolyse de l'eau à très haute température est en étude.

Les lanceurs spatiaux, utilisent la réaction très énergétique hydrogène/oxygène.

Quand on comprime un gaz, il s'échauffe et cette énergie est perdue ! Le rendement de la production et du transport sont très coûteux. L'énergie d'oxydation de l'hydrogène sera convertie en électricité par une pile à hydrogène. Ces piles sont encore très coûteuses (mousse de platine).

On utilisera donc l'hydrogène plutôt sur de courtes distances : chariots élévateurs, tracteurs, trains de banlieue (Allemagne), flotte d'autobus Pau, Pas de Calais, Yvelines...

Elle est développée en priorité pour la propulsion d'automobile, par Ballard au Canada avec DaimlerChrysler et Ford, qui investissent des milliards de dollars.

Stockage statique de l'énergie

- Energie cinétique

Quand on ne peut disposer que d'énergie d'électricité intermittente, on peut transformer un excès momentané en énergie cinétique. On remonte de l'eau par pompage dans les retenues en Suisse et en Italie depuis 1890, mais la puissance mondiale ainsi stockée atteint maintenant 155 GW. Chine, Japon, États-Unis. Le système accuse cependant une perte d'environ 20 %.



On peut stocker et récupérer l'énergie cinétique d'un volant d'inertie. La capacité de stockage croît comme le carré de la vitesse de rotation. On évite le frottement de l'air et le frottement aux paliers : dans un cylindre en acier, ou l'air est maintenu à basse pression, on fait tourner à 60 000 rpm un cylindre à axe vertical, avec un moteur électrique, le tout en lévitation magnétique. On récupère l'énergie en utilisant le moteur comme alternateur.

Ce système est utilisé pour lisser les à-coups d'intensité du métro de Rennes en récupérant l'énergie de freinage et en évitant les surcharges électriques lors des démarrages.

Il en sera de même à Paris pour la ligne 14.

On construit ainsi des « fermes » de stockage de l'énergie

En Afrique, on envisage de faire tourner de gros volants de béton, pour maintenir, de nuit, l'alimentation en électricité des villages ; elle serait produite de jour par des panneaux photovoltaïques.

- Stockage de chaleur

Soit pour lisser les besoins en chaleur sensible, soit pour lisser la production d'énergie électrique on utilise, avec divers succès :

* Chaleur sensible : C'est un transfert thermique sans changement d'état. Cela se fait dans des cuves, des réservoirs aquifères, des bétons céramiques, des graviers de 30 à 80 °C directement ou avec des pompes à chaleur, forcée dans des lieux divers Pays Bas comme au Richtag à Berlin. Les rendements ne dépassent pas 50 %,

* Chaleur latente : des changements de phase des acides gras, des paraffines, de sels hydratés, de l'eau, plutôt en basses températures (-15 °C, 0 °C)

* Thermochimie, avec la déshydratation bromure de strontium, ou du chlorure de calcium pour stocker l'énergie solaire avec de faibles pertes thermiques avec un volume d'une dizaine de m³ pour une maison individuelle et 20-50 cycles/an.

On procède aussi à l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène. C'est le cas en Corse pour lisser l'énergie voltaïque, antennes relais, hôpitaux groupes de secours, etc.

Dans les piles à hydrogène à oxydes solides (oxyde de zirconium ou de fer-strontium), fonctionnant entre 400 et 1000 °C, on peut produire jusqu'à 2 MW produisant électricité et chaleur.

C'est le système proposé par Siemens Westinghouse à Pittsburg : une pile de 200 kW électrique couplée à une turbine à gaz de 50 kW avec un rendement de 55 % valable pour gros immeubles.

La pile à membrane électrolyte polymère travaille à basse température ; elle démarre en quelques secondes. Et peut servir aussi de générateur de secours,

D'autres piles utilisent un mélange air méthane ou même de gaz de ville avec un équipement Japon 150 000 unités Allemagne; on atteint 80 % de rendement.

* Stockage de l'électricité

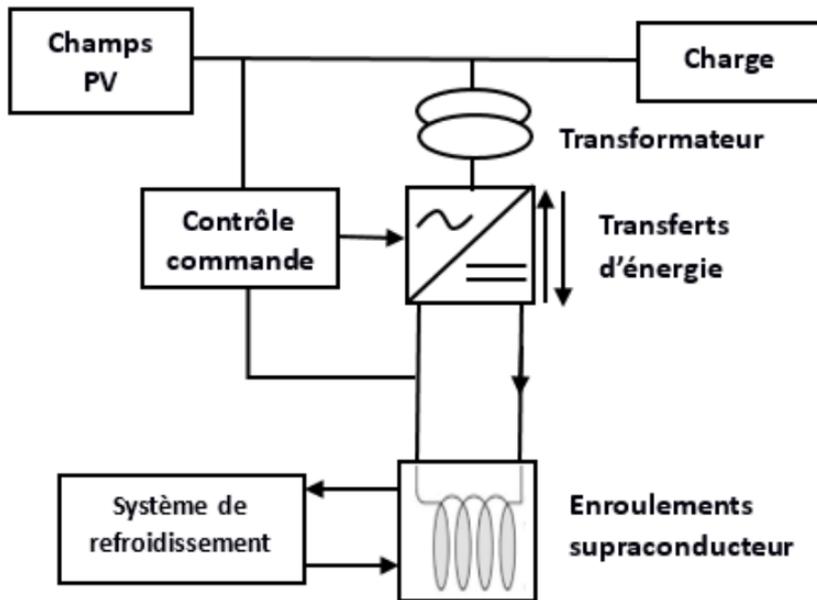
Sous forme électrique : les supercondensateurs sont de plus en plus utilisés pour récupérer l'énergie du freinage pour alimenter le système Stop & Start ou relancer la voiture après un virage (Toyota depuis 2012).

On les utilise pour le contrôle de l'orientation des pales des éoliennes.

Certains vélos électriques l'utilisent déjà.

Le système BOMBARDIER*MITRAC (Allemagne) le teste depuis 2003 sur un réseau de transport.

Sous forme magnétique : on sait stocker plusieurs centaines de kilojoules d'énergie dans le champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu de forte intensité dans une bobine supraconductrice avec un rendement de 95 % (**SMES**, ou *superconducting magnetic energy storage* – stockage d'énergie magnétique supraconductrice).



*Rendement supérieur à 90 %.
Durée de vie très élevée.
Investissement lourd.
Rayonnement électromagnétique.*

Par effet Hall quantique (les électrons sont corrélés et descendent à l'état fondamental sur la couche N=1), on pourrait stocker jusqu'à 1 TJ.

CONCLUSION

Nous sommes condamnés à n'utiliser comme source d'énergie que l'énergie électrique. Nous devons donc la produire, la transporter, la stocker et l'utiliser avec des rendements élevés afin de ne pas produire trop d'énergie thermique fatale. Nous travaillons avec acharnement depuis plusieurs années et les domaines les plus intéressants, les plus passionnants, et aussi les plus difficiles sont ceux de la fusion nucléaire, des matériaux supraconducteurs à « haute » température et les diverses formes de stockage. Le retard pris à prendre conscience, à décider, à découvrir et à réaliser va vraisemblablement coûter la vie à beaucoup d'humains. Il importe de motiver la génération montante à prendre la relève car il y a encore beaucoup de travail exaltant à faire.