**Cycle de formation 2018-2019**



 ***Changements climatiques et modes de vie***

Maison Diocésaine "Le Carmel"

13 rue des Ursulines, 37000 Tours

**5ème partie. LES SOURCES D’ÉNERGIE : ENJEUX ET CRITÈRES DE CHOIX**

*Bernard LECLERCQ*

 Le développement d’Homo sapiens a été trés lié à sa capacité de trouver des sources d’énergie supérieures à la sienne propre. C’est ainsi qu’avec la sédentarisation et la découverte de l’agriculture, l’homme s’est adjoint des animaux (âne, cheval, bœuf…) pour travailler la terre et effectuer des transports. Puis vint la maîtrise du vent et de l’eau, l'utilisation du charbon, l'invention de la machine à vapeur et l'exploitation du pétrole, enfin la découverte de l’électricité et de l'énergie atomique. Une étroite relation a toujours existé entre la production de biens (mesurée par le PIB) et la consommation d’énergie. Mais avec la production de gaz à effets de serre (GES) résultant de l’utilisation massive des sources fossiles d’énergie (charbon, pétrole, gaz), le système énergétique mondial a atteint ses limites. Faute de trouver d’autres sources d'énergie, l’homme est-il condamné à renoncer à tout ce qui a permis son développement, sa santé et son confort ?

 **1. Quelques définitions préalables.** Il faut, lorsqu'on parle d'énergie, de bien distinguer ***puissance*** et ***énergie réellement produite.*** La puissance est l’énergie maximale qu’une source peut produire par unité de temps, alors que l’énergie réellement produite résulte à la fois de cette puissance et du temps de fonctionnement réel de la source. Pour la **production d'électricité** par exemple, toutes les sources ne sont pas aptes à produire sans interruption et au maximum de leur capacité : la production des éoliennes est maximale avec des vents dont la vitesse est supérieure à 50 km/h ; en dessous de 15 km/h elles s’arrêtent. Les panneaux photovoltaïques ne produisent que pendant le jour. On définit donc pour chaque source un ***coefficient de charge***, rapport entre l'électricité réellement produite pendant un temps donné (une année par exemple) et celle qu’elle pourrait produire en fonctionnant sans arrêt à plein régime. Le tableau 1 donne les valeurs constatées en France en 2016, compte-tenu des temps réels d'utilisation de chaque source.

|  |
| --- |
| Tableau 1. Coefficients de charge des sources d'électricité (%). France 2016 |
| Nucléaire | Charbon | Fioul | Gaz | Hydraulique | Éolien | Photovoltaïque |
| 69 | 28 | 5 | 34 | 28 | 20 | 14 |

 On exprime la puissance d’une source en **kilowatt (kW)** = 1000 watt, **Mégawatt** **(MW)** = 1000 kW, **Gigawatt (GW)** = 1 million de kW, et **Térawatt (TW)** = 1 milliard de kW. Pour l’énergie réellement produite, on parle de même de kilowatt-heure (KWh), de Mégawatt-heure (MWh), de gigawatt-heure (GWh) ou de Térawatt-heure (TWh). La tonne-équivalent-pétrole (Tep), utilisée par ailleurs vaut 111.630 kWh.

 Les coefficients de charge permettent de mieux apprécier le "rendement" de chaque source dans ses conditions réelles d'utilisation. Exemple : sur une année (8 760 heures) 1 MW de puissance installée en éolienne (coefficient de charge de 20%) produit 1 x 8760 x 0,20 = 1 752 000 kWh, alors que 1 MW de centrale nucléaire (coefficient de charge 69%) produit 1 x 8760 x 0,69 = 6 044 000 kWh par an, soit 3 fois le MW installé en éolien. On distingue aussi l'***énergie primaire*** (source de la suivante) et l'***énergie finale,*** utilisable par le consommateur et qui est inférieure à la précédente. Exemple : 1 tonne de charbon (soit à peu près 7.700 kWh) transformée en électricité ne donne que 3 000 kWh.

 **2. Origines de nos sources d’énergie.** Notre planète ne dispose que de 3 origines d'énergie : la Terre **elle-même,** le **Soleil** et (modestement) la **Lune**. Notre planète a des réserves énormes de chaleur en son sein : le cœur de la terre atteint en effet des températures de plus de

5 000°C ; à 500 mètres de profondeur la température est de l’ordre de 30°C et à 2 000 mètres elle atteint 80°C ; ce gradient de température permet le développement de la géothermie et des « puits canadiens » (grâce aux pompes à chaleur). Un gradient de température existe également dans les océans dont les eaux les plus profondes sont les plus froides (environ 2°C). Enfin les sols renferment des sources d'énergie « fossiles » de deux sortes, celles d’origine carbonée (charbon, pétrole et gaz) provenant de la dégradation de déchets végétaux et animaux accumulés il y a plus de 300 millions d’années, et les éléments radioactifs (Uranium et Thorium entre autres).

 La deuxième et principale origine de nos sources d’énergie est **le soleil** qui nous envoie ses rayonnements infrarouges et lumineux (photons), eux-mêmes à l’origine des vents (énergie éolienne), des cycles de l’eau (énergie hydraulique), et des grands courants marins. **La lune**, à l'origine des marées, génère aussi des courants marins. Jusqu’à présent l’humanité a beaucoup négligé les ressources non-carbonées qui, pourtant, sont pratiquement illimitées et n’induisent pas d’effet de serre ; un jour il ne nous restera qu’elles. Le tableau 2 illustre bien la priorité accordée de façon irresponsable aux réserves carbonées.

|  |
| --- |
| Tableau 2. Énergies primaires consommées dans le monde et en France (Mtep) |
|  | Charbon | Pétrole | Gaz | Nucléaire | En. Renouv. | **TOTAL** |
| Monde 2013 | 3 901 | 4 198 | 2 889 | 648 | 512 | **13500** |
| France 2014 | 8,8 | 77,4 | 35,9 | 116,6 | 18 | **257** |

 Source : Agence Internationale de l'énergie. Wikipédia.

**3. Caractéristiques des sources d’énergie productrices d'électricité.** La première caractéristique est **la disponibilité**, estimée par le *coefficient de charge* déjà cité. Les chiffres donnés au tableau 1 en sont une illustration, sachant qu'ils peuvent varier en fonction de la technologie propre aux installations et des conditions de l’année. De façon moins directe, ce coefficient dépend aussi de la priorité donnée à l’usage d’une source par rapport aux autres. Exemple : les centrales thermiques à gaz sont chargées surtout de combler la défaillance des éoliennes en cas de manque de vent ; elles sont donc sollicitées de façon inopinée et, en général, sous-exploitées. Leur coefficient de charge est donc modeste, mais pourrait être beaucoup plus élevé (proche de 80%) si l'on n’avait qu’elles pour alimenter le réseau électrique !

|  |
| --- |
| Tableau 3. CO2 produit par les différentes sources d'électricité (g CO2eq / kWh) |
| Charbon | Fioul | Gaz | Bois | Photovolt. | Hydrol. | Éolien | Nucléaire |
| 950 | 750 | 675 | 50 | 30 | 15 | 14 | 10 |

 Source : Weiner, IAEA, 2006

 La deuxième caractéristique importante des sources d'électricité est la **quantité de CO2 libérée par kWh produit**, objet du Tableau 3 dans lequel le CO2 indiqué est la somme des quantités produites pour la construction, le fonctionnement et le traitement des déchets. Ensuite, il faut s’intéresser au **coût de l’investissement par kW installé** et prendre en considération **la durée de vie** de l’installation qui détermine l’amortissement de l’investissement engagé. On doit tenir compte enfin des réserves disponibles, particulièrement pour les sources « fossiles ». C'est l'ensemble de ces caractéristiques qui détermine **le prix de revient du kWh**. Le tableau 4 permet de comparer les sources mais n’intègre ni les frais du réseau de transport ni ceux induits indirectement par l’intermittence des éoliennes et du photovoltaïque.

|  |
| --- |
| Tableau 4. Coût moyen du kWh électrique selon la source (en centimes d'€ / kWh) |
| Géothermieélectrique | Éolien terrestreancien | Éolien terrestre récent | Éolienen mer | Centralephotovolt | Photovolt.individuel | Centrale solairethermique | Nucleairehistorique | EPR | Gaz |
| 4,8 | 7,6 | 6,8 | 17,4 | 10,5 | 25,4 | 19,3 | 6,0 | 11,0 | 8,0 |

 Source : Alternatives économiques n°111, 2017.

 **4. Les sources d’énergie « fossiles ».** Le **charbon** est, au niveau mondial, la seconde source d’énergie primaire et la première pour la production d’électricité (rendement énergétique de 35 à 45%). Le charbon présente plusieurs gros défauts : 1) il produit beaucoup de CO2, 2) il est difficile à transporter, 3) il produit beaucoup de déchets (cendres), 4) il pollue l’atmosphère (micro-particules, soufre, arsenic…), 5) son extraction en fait la plus meurtrière des sources d’énergie. Ses réserves sont estimées à 450 Milliards de Tep, détenues principalement par 9 pays (Australie, USA, Russie, Ukraine, Pologne, Afrique du Sud, Chine, Inde et Kazakstan).

 Le **pétrole** est la première source d’énergie primaire dans le monde  et la seconde pour produire de l’électricité (rendement énergétique 20 %) grâce à des turbines à combustion très aptes à répondre rapidement à la demande. Ses réserves sont estimées à 240 Milliards de Tep ; il est la source fossile qui se tarira vraisemblablement la première si l’on continue à l’exploiter au rythme actuel, tant pour les transports que pour l'industrie chimique. Peu de pays en sont détenteurs mais il est facile à transporter.

 Le **gaz naturel** constitue une réserve importante d’énergie primaire : estimations = 170 Milliards de Tep. Il sert surtout au chauffage, à la production d’électricité (rendement de 50 % par des turbines combinant la vapeur et des gaz chauds) et à la fourniture d’hydrogène pour l’industrie chimique. Des trois sources fossiles carbonées, le gaz est celle qui produit le moins de CO2 par kWh. Il est facilement transporté par un grand réseau de gazoducs et peut être aisément stocké sous terre. Avec l’électricité, il est (et sera) un excellent vecteur d’énergie pour le futur.

 La **radioactivité** peut être considérée comme une énergie « fossile » d'exploitation récente. Elle se trouve sous forme d’Uranium 235 (U235) et de Thorium 232 (Th232). Seule la filière Uranium est exploitée industriellement mais celle du Thorium fait l’objet d’études de la part de la Chine et de l’Inde. Pour la production d'électricité, la filière nucléaire a le gros avantage d’avoir un coefficient de charge élevé puisqu'en principe un réacteur peut tourner à plus 80 % de sa capacité nominale. Il peut également, comme le charbon, le pétrole et le gaz répondre rapidement à la demande. Il a enfin la caractéristique très intéressante de dégager très peu de CO2 par kWh, de sa construction à son démantèlement. Avec l’hydraulique (barrages), le photovoltaïque et l’éolien, il est apte à produire le kWh le plus décarboné (voir tableau 3). Le nucléaire a 3 inconvénients : 1) Il fait peur (références à la bombe eà des attaques terroristes), 2) Il nécessite un gros investissement dans la construction et le délai de celle-ci (de 3.000 à 6.000 € par kW de puissance installée contre 1.000 à 1.500 € pour l’éolien terrestre). À noter toutefois que, si la durée de vie d’un réacteur a été fixée à 40 ans, elle pourrait être portée (comme aux USA) à 60 ans ; pour comparaison, l’éolien et le photovoltaïque ont une durée de vie officielle de 20 à 30 ans. 3) les déchets radioactifs, quoique peu volumineux, posent un gros problème de durée de stockage (plusieurs siècles, voire des millénaires). L’énergie nucléaire est très concentrée : 1 gramme d’U235  produit autant d’énergie qu’une tonne de pétrole. Les réserves d’Uranium sont estimées à 7 millions de tonnes ; la consommation mondiale étant actuellement de 64 000 tonnes par an, la réserve est donc de 100 ans de fonctionnement au rythme actuel. Les réserves de Thorium sont 3 fois plus abondantes que celles de l’Uranium.

 **5. Les énergies dites « *renouvelables* ».** Les plus significatives actuellement sont la biomasse, l’hydraulique (les barrages), l’éolien et le photovoltaïque (PV). **L’hydraulique** est la transformation de l’énergie potentielle de l’eau retenue par les barrages de montagne en énergie électrique. Ses limites sont le nombre de sites qui peuvent être ainsi équipés et la pluviométrie en haute montagne. C’est une énergie bon marché et qui peut constituer une forme de stockage dans la mesure où certains barrages peuvent, lors des heures "creuses", être rechargés en eau avec l’énergie électrique en excès sur le réseau.

 **La biomasse** provient de l'utilisation par les plantes du CO2 atmosphérique pour synthétiser des glucides (amidon, cellulose…) et des lipides (huiles végétales). Le CO2 dégagé lors de sa combustion n’est, en conséquence, pas comptabilisé dans les gaz à effet de serre (GES). Le **bois** est la principale forme de biomasse utilisée, notamment dans les pays en développement; ses usages pour le chauffage et la production d’électricité augmentent chaque année en Europe. Les **agro-carburant**s destinés aux moteurs diésel ou à essence proviennent de cultures différentes si possible des celles destinées à l'alimentation humaine. Leurs rendements énergétique et financier sont assez médiocres et il est de toute façon impossible d’y consacrer des emblavements importants. Le **biogaz** enfin est produit par fermentation de déchets organiques ou de cultures spéciales, dans des digesteurs. Il contient 70 % de méthane, du CO2, de la vapeur d’eau et d’autres gaz. Sa production se développe beaucoup en Europe, spécialement en Allemagne, et au Canada. Lorsqu'il est purifié, le méthane obtenu peut servir de substitut au gaz « naturel » et même être employé comme carburant pour véhicules. Son coefficient de charge en production d'électricité devrait être voisin de 70% mais, pour le moment, l’investissement initial reste élevé, de l’ordre de 4 500 à 6 000 € par kW.

 **L’éolien** se trouve sous forme terrestre et marine. L’éolien terrestre présente un coefficient de charge de 20 à 25 % avec un investissement de départ limité. Ce coefficient atteint pratiquement 30 % pour l’éolien marin. Les gros problèmes de l’éolien sont 1) son raccordement au réseau et surtout 2) l’imprévisibilité de sa production qui font de lui une source *intermittente*. **Le solaire** se décompose en solaire thermique et solaire photovoltaïque. Le premier consiste en **chauffe-eau** solaires qui se limitent à produire de l’eau chaude à un prix très intéressant dans les zones bien exposées ; des centrales thermiques solaires sont à l'étude mais pas encore opérationnelles. Le **photovoltaïque (PV)** consiste à transformer l’énergie des photons lumineux en électrons grâce à des semi-conducteurs au silicium dopé. Son rendement est assez médiocre : en France, 1 m² de panneau récupère de l’ordre de 0,1 kW de puissance électrique, soit 110 kWh par an. L’investissement est assez élevé pour des petites surfaces (environ 3000 € par kW de puissance installée) mais plus faible pour des « fermes photovoltaïques ». Le coefficient de charge est de 10 à 13 % et la durée de vie estimée à 25 ans. La production d’électricité du PV est plus prévisible que celle de l’éolien, mais il s'agit tout de même d'une source intermittente.

 **La géothermie, l’aérothermie et le thermique marin** consistent à récupérer les calories de l’air, de la terre ou de la mer. Lorsqu'elle atteint des couches d’eau à température élevée, la géothermie peut servir au chauffage urbain ou à la production d’électricité. Sinon, comme l’aérothermie, elle permet, grâce aux pompes à chaleur, de récupérer des calories avec un rendement énergétique qui se situe entre 2,5 à 4,5 kWh par kWh consommé.

 **6. Le défi de l’intermittence**. Comment assurer la continuité de l’approvisionnement énergétique de l’humanité sans émettre de GES, avec des sources à la fois «*renouvelables* » et «*intermittentes*» en proportions élevées ? Comment, en particulier, mettre fin à l’utilisation du charbon, du gaz et du fioul, pour produire de l’électricité ? En France, le nucléaire représente actuellement la source majeure mobilisable à volonté. Que représenterait sa substitution par des sources "renouvelables" ? Simplifions le problème : comment remplacer, par exemple, 1 réacteur nucléaire (1 GW, coefficient de charge de 75%) par des éoliennes (2 MW, coefficient de charge de 23%) ? Pour disposer de la même puissance installée, il "suffirait" de 500 éoliennes. Mais, compte-tenu des coefficients de charge, il en faudrait 1.630 pour avoir la même énergie réellement produite sur une année, puisqu'1 MW d’éolien produit 3,25 fois moins de kWh par an qu’1 MW de nucléaire. En outre, sur les 6,57 TWh produits par an par toutes les éoliennes, 23 % seraient consommés directement et 77 % devraient être stockés. Il existe plusieurs moyens de stocker l’énergie électrique. La plus efficace est de remonter de l’eau dans les barrages (STEP) avec un rendement estimé à 65 %. Le second est de produire de l’hydrogène par hydrolyse avec un rendement de 50 %. Il faudrait donc des éoliennes supplémentaires pour couvrir cette "perte" énergétique due au stockage : dans le premier cas (STEP), environ 680 éoliennes de 2 MW, et dans le cas de l’hydrogène 1.265. *In fine*, il faudrait donc entre 2.300 et 2.900 éoliennes pour remplacer un réacteur et, pour en fermer 20 (descendre à 50 % d’électricité nucléaire), entre 46.000 et 57.000.

 Un raisonnement similaire pourrait être appliqué au photovoltaïque mais de tels calculs ne sont évidemment qu'indicatifs ; la problématique réelle est beaucoup plus complexe. Outre le fait qu'il ne peut s'agir que de transformations étalées dans le temps,  des possibilités complémentaires existent : 1) réduire le gaspillage d’énergie (mais à quel rythme?), 2) améliorer l’efficacité énergétique, 3) adapter la production à la consommation (compteurs « intelligents »), 4) revoir complètement nos modes de transport, 5) combiner efficacement, selon les sites, plusieurs sources de "renouvelables".

 **7. Conclusion.** Il faut, pour lutter contre les GES, sortir au plus vite du charbon et réduire drastiquement l’usage du gaz « naturel » et du pétrole, ce qui pose un énorme problème aux pays disposant de réserves fossiles importantes. Se greffe sur ce problème celui des *métaux* et *terres rares* qui entrent dans la composition des alliages et semi-conducteurs nécessaires aux installations de conversion des énergies primaires en énergies finales. Face à ces défis majeurs, seule une concertation mondiale peut avoir une chance d'aboutir à une solution réellement efficace. On nous dit qu'il est (peut-être) encore temps …