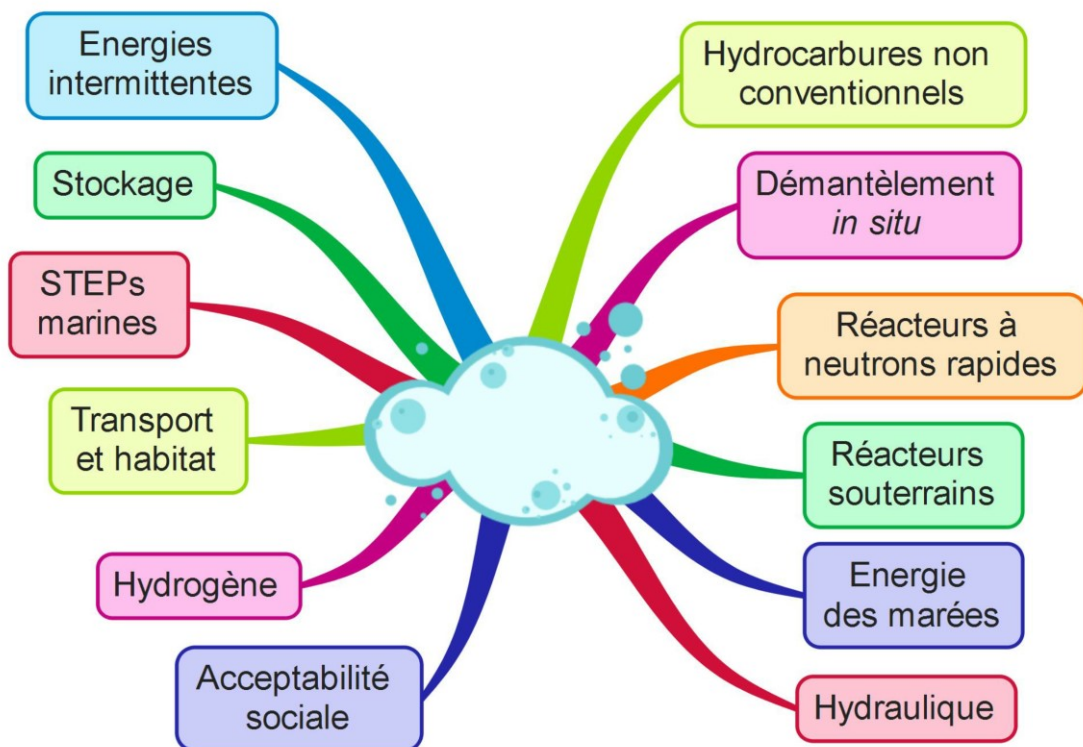


Énergies fossiles, Nucléaire et Renouvelables

L'embaras du choix

Christian Ngô et François Lempérière



Énergies fossiles, Nucléaire et Renouvelables

L'embaras du choix

Christian Ngô et François Lempérière

Table des matières

1. Introduction
2. Qu'est-ce que l'énergie ?
 - Uniformité du temps et énergie
 - Les formes d'énergie
 - Transformations énergétiques
 - Source d'énergie
 - Vecteurs énergétiques
 - Puissance
3. Des lois physiques incontournables
 - Travail et chaleur
 - Les principes de la thermodynamique
 - L'entropie
 - En deux mots
4. Les Unités
5. De l'énergie primaire à l'énergie utile
 - L'énergie primaire
 - L'énergie finale
 - L'énergie utile
 - En deux mots
6. La domination des énergies fossiles
 - D'où vient l'énergie ?
 - Évolution de la consommation
 - Quelles sources d'énergie ?
 - La domination des combustibles fossiles
 - En deux mots
7. Énergie et espérance de vie
 - En deux mots
8. L'effet de serre naturel est utile
 - Sans effet de serre il ferait très froid
 - L'effet de serre
 - Les gaz à effet de serre
 - En deux mots

9. L'effet de serre anthropique

Le secteur énergétique

Énergie et espérance de vie

Les émissions de CO₂

En deux mots

10. Ne pas confondre énergie et émissions de CO₂

Diversité de production électrique

Consommer en émettant peu de CO₂

En deux mots

11. Le défi énergétique français

Contraintes et défis

La troisième contrainte de la France

En deux mots

12. L'utopie du facteur 4 de réduction des émissions de CO₂

Pourquoi un facteur 4

Émissions de CO₂ des pays

Évolution des émissions de CO₂ en France

Objectif : facteur 2

En deux mots

13. Capture et stockage du CO₂ : le compte n'est pas bon

Quelles solutions?

Capture du CO₂

Transport du CO₂

Stockage du CO₂

Est-ce réaliste

Toxicité du CO₂

En deux mots

14. Hydrocarbures non conventionnels

Hydrocarbures de roche mère et de réservoirs compacts

La fracturation hydraulique

Impact de la fracturation sur l'environnement

Les hydrates de méthane

Fracturer ou pas ?

En deux mots

15. Le nucléaire est-il utile ?

Fission

Réacteur nucléaire

Intérêt économique

Pas d'émission de CO₂

Réserves d'uranium

Les déchets nucléaires

En deux mots

16. Les réacteurs nucléaires rapides

De l'²³⁸U au ²³⁹Pu

Réacteur à neutrons rapides

Les réserves

La filière thorium

Le futur du nucléaire

En deux mots

17. Démantèlement : faire simple plutôt que compliqué

Réacteurs en fin de vie

Stratégies de démantèlement

Le démantèlement in situ

En deux mots

18. Les réacteurs nucléaires doivent-ils être souterrains ?

Faisabilité

Sécurité

Coût

Perspectives de réalisation en France

Les réacteurs à neutrons rapides

Perspectives à l'exportation

En deux mots

19. Accidents nucléaires : le risque zéro n'existe pas

L'échelle INES

Accidents nucléaires

Perception des accidents

En deux mots

20. L'Hydroélectricité

L'hydraulique traditionnelle

Avantages de l'hydroélectricité

Impacts sur l'environnement

Stockage d'Énergie par STEPs (Station de Transfert d'Énergie par Pompage).

L'hydroélectricité en France

En deux mots

21. L'énergie des marées : une chance perdue pour la France ?

Principe

L'énergie marémotrice dans le monde

Dimensionnement

Impacts sur l'environnement

L'énergie marémotrice en France

En deux mots

22. L'« Énergie Verte » est-elle renouvelable et décarbonée ?

Quelques données

Les terres cultivables

Les chiffres officiels sont-ils représentatifs ?

Est-ce une énergie renouvelable ? Est-ce une énergie décarbonée ?

En deux mots

23. Pourquoi stocker l'énergie ?

Sources et vecteurs énergétiques

Le stockage intrinsèque

Stocker l'électricité

Stocker la chaleur

En deux mots

24. Comment stocker l'électricité ?

Le stockage décentralisé

Stocker : pas si simple

Les différentes technologies

En deux mots

25. Stocker l'énergie électrique en mer !

Les STEPs traditionnelles

Les STEPs marines

Les STEPs fluviales

En deux mots

26. Énergies intermittentes et stockage d'énergie

Est-il nécessaire de stocker l'énergie électrique ?

Surcoûts

Est-il utile de stocker l'énergie électrique ?

Est-il possible de réaliser beaucoup de STEPs ?

Autres moyens de stockage de l'énergie électrique

Les énergies intermittentes à l'échelle mondiale

En deux mots

27. Comment stocker la chaleur ?

Deux échelles de temps

Moyens de stockage

La pompe à chaleur

En deux mots

28. Les transports

Transports sur terre, sur mer et dans les airs

Émissions de CO₂

Les transports en commun

Les véhicules hybrides

Le véhicule électrique

Quelques chiffres

En deux mots

29. L'habitat

Une évolution lente

Consommation énergétique

Il faut rénover

Constructions neuves

Transports et habitat

En deux mots

30. Le vecteur hydrogène

Abondant dans l'univers

Production

Transport

Stockage

En deux mots

31. Utilisations énergétiques de l'hydrogène

Utilisation directe

Piles à combustible

Transports et piles à combustibles

Applications prometteuses

En deux mots

32. L'hydrogène naturel

L'hydrogène naturel dans l'océan

L'hydrogène naturel sur les continents

En deux mots

33. Ressources minérales et énergie

Des minerais de plus en plus pauvres

Réserves

Des nouvelles technologies pas si vertes que ça

Tout n'est pas recyclable

Impact sur l'environnement

En deux mots

34. Énergie nucléaire ou énergies renouvelables

L'énergie nucléaire

Les réacteurs actuels

Les réacteurs futurs

Les énergies renouvelables

Perspectives globales

L'énergie mondiale

35. L'acceptabilité sociale

Où l'égalité conduit à des inégalités

Récompenser aussi les individus

En deux mots

36. Remarques finales

37. Bibliographie

Quelques livres

Quelques sites internet

38. À propos des auteurs

François Lempérière

Christian Ngô

1. Introduction

L'énergie est indispensable à la vie et au développement économique. Tous les pays ont besoin de pouvoir accéder à des sources d'énergie abondantes et peu chères, qu'ils soient pauvres, en voie de développement ou riches. Depuis plusieurs décennies, les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) couvrent environ 80 % des besoins en énergie primaire (*i.e.* avant toute transformation) de l'humanité. Les sociétés modernes utilisent pour l'essentiel ces combustibles qui sont d'une part en quantité finie sur la terre, donc épuisables, et émettent en brûlant du dioxyde de carbone (CO₂) qui contribue pour une large part à l'augmentation de l'effet de serre.

Le développement massif du nucléaire en France dans les années quatre-vingt a permis de produire de l'électricité peu chère avec des émissions de CO₂ négligeables. Après le choc pétrolier des années soixante-dix, il était nécessaire de substituer les moyens de production d'électricité basés sur les combustibles fossiles par d'autres plus sûrs en termes d'importation. C'est une des raisons du choix nucléaire qui a permis d'accroître fortement l'indépendance énergétique pour la production d'électricité. Par contre, seules les économies d'énergie, une utilisation plus importante de l'électricité dans des usages utilisant initialement du pétrole, et des progrès technologiques, ont permis de réduire un peu notre dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. Ceux-ci constituent encore la plus grande partie du déficit commercial de notre pays. Le déficit total de la balance commerciale était par exemple de 69,6 milliards d'euros en 2011, dont 61,4 milliards d'euros attribués aux seuls combustibles fossiles.

Parmi les énergies renouvelables, la biomasse et l'hydraulique dominent le marché mondial. En 2014, la biomasse et les déchets représentaient 10,3 % de l'énergie primaire consommée dans le monde. Dans ce bilan, l'hydraulique contribuait pour 2,4 %. La contribution des autres énergies renouvelables, dont l'éolien et le photovoltaïque qui font l'objet de subventions très importantes et d'efforts énormes, n'est que de 1,4 %. Toutefois, les coûts de ces dernière énergies baissent beaucoup depuis quelques années.

L'énergie réellement utile - une notion qui sera introduite plus loin - ne représente qu'environ 40 % de l'énergie primaire. Elle provient pour 80 % des énergies fossiles, pour 5 % de l'énergie nucléaire, pour 5 % de la biomasse, pour 5 % de l'hydroélectricité et pour 5 % de l'éolien, du solaire et de la géothermie.

Pendant longtemps l'hydraulique a été une source d'énergie importante pour produire de l'électricité. En 1965, par exemple, la consommation nette d'électricité en France s'élevait à 94 TWh et la production électrique issue de l'hydraulique se montait à 46 TWh, soit près de la moitié de la consommation (49 %). En 2013, 76 TWh ont été produits par l'hydraulique pour une consommation nette totale de 460 TWh ce qui ne représente plus que 16,5 % alors que la production hydraulique a doublé par rapport à 1965. La croissance de la consommation a donc été bien supérieure à celle de la production hydraulique. Notons que les autres sources d'énergie renouvelables n'ont fourni que 26,8 TWh en 2013, dont 15,9 TWh d'origine éolienne et 4,6 TWh d'origine photovoltaïque.

Si l'on veut réduire les émissions de CO₂ pour limiter l'accroissement anthropique (*i.e.* dû à l'homme) de l'effet de serre, il faut réduire la consommation de combustibles fossiles. Pour

l'électricité, seules l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables peuvent répondre à cette contrainte. Si l'électricité est produite sans émettre de gaz à effet de serre, il faut utiliser au maximum celle-ci dans les usages où l'on peut remplacer les combustibles fossiles par l'électricité.

Ce petit livre est né de la rencontre de deux passionnés des problèmes énergétiques ayant des formations, des approches différentes et des expériences professionnelles complémentaires. Les auteurs ont essayé de rechercher un consensus pour :

- Présenter aussi objectivement que possible les faits sur des sujets complexes qui sont souvent l'objet de polémiques et de désinformation.
- Introduire de nouvelles idées et suggérer sur certains points d'autres solutions que celles qui sont admises par habitude ou imposées par dogmatisme ou intérêt. Certaines sont peut-être irréalistes, d'autres inapplicables pour des raisons d'acceptabilité sociale, certaines enfin demandent peut-être des approfondissements et peuvent induire une façon différente d'aborder certains problèmes. Elles devraient néanmoins être examinées de manière plus approfondie.
- Ils ont cherché à concilier théorie, technologie, économie, environnement, société et bon sens pour suggérer de nouvelles approches sur des sujets essentiels dont les données évoluent rapidement.

Les auteurs pensent que le problème, en France comme dans le monde, n'est pas la pénurie d'énergie mais l'embarras du choix entre des solutions viables et économiques qui peuvent prévaloir au milieu du siècle. Nous sommes actuellement à un tournant énergétique, désigné parfois sous le vocable de « **transition énergétique** », dont la mise en œuvre dépend des pays mais dont certains éléments sont souvent en contradiction avec les buts à atteindre à cause de positions dogmatiques.

Notre travail n'aura pas été vain si ces réflexions peuvent induire des approches nouvelles sur certains sujets et si cela a permis au lecteur de mieux appréhender certains aspects du domaine énergétique.

2. Qu'est-ce que l'énergie ?

On a besoin d'énergie pour vivre et se développer mais la notion d'énergie est difficile à définir car elle recouvre de multiples facettes. Fondamentalement, l'énergie est liée à une symétrie de la nature mais les formes d'énergies qui nous intéressent en pratique apparaissent lors de transformations physiques, chimiques ou biologiques.

Uniformité du temps et énergie

Le **temps est uniforme** ce qui signifie que si l'on réalise une expérience dans les mêmes conditions à deux moments différents on trouvera le même résultat. La même expérience réalisée aujourd'hui à Paris donnera le même résultat que si elle a été réalisée à New-York dix ans plus tôt. La conséquence de cette uniformité du temps est qu'il existe une quantité, **l'énergie**, qui est conservée pour un système isolé, c'est-à-dire sans interaction avec le milieu extérieur. Cette définition n'a bien entendu aucune utilité pour le consommateur que nous sommes. En fait le consommateur s'intéresse aux **formes et transformations d'énergie** qui ont pour lui une utilité dans la vie courante. C'est notamment le cas de la **chaleur** ou du **travail**. En brûlant du bois on va par exemple produire de la chaleur permettant de se chauffer ou de cuisiner. En utilisant de l'essence dans une voiture on va transformer une partie de son énergie de combustion en travail permettant de propulser le véhicule.

On sait aussi que l'espace est **homogène, isotrope** et **uniforme**. L'homogénéité de l'espace, son isotropie et l'uniformité du temps conduisent aux lois de conservation de la figure 1.

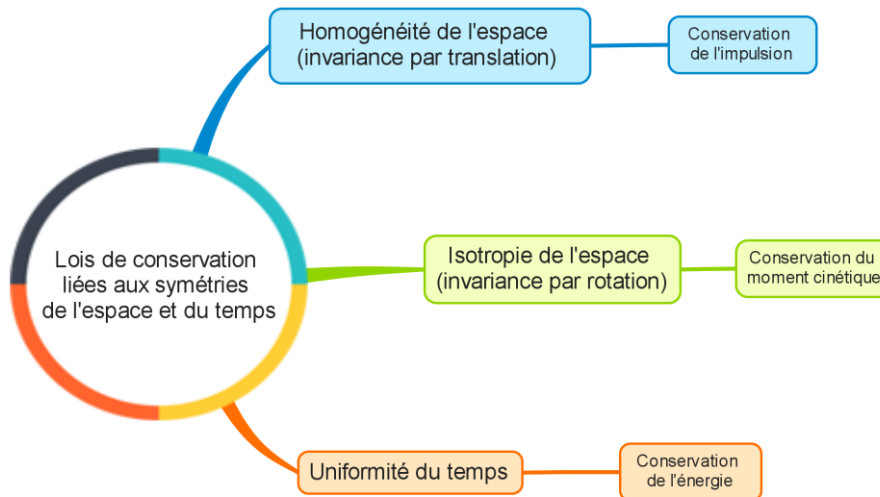


Figure 1. L'espace est homogène et isotrope (une même expérience donne le même résultat si l'on fait subir au dispositif une translation ou une rotation dans l'espace). Cela conduit à la conservation de l'impulsion et du moment cinétique. L'uniformité du temps conduit à la conservation de l'énergie.

Les formes d'énergie

La figure 2 indique quelques formes d'énergie utilisées par l'homme. On les obtient lors de la transformation d'un état énergétique. Par exemple, l'énergie chimique contenue dans l'essence est transformée, lors de sa combustion, en énergie mécanique, dont une partie sert à la propulsion et aux frottements, et l'autre partie en chaleur.

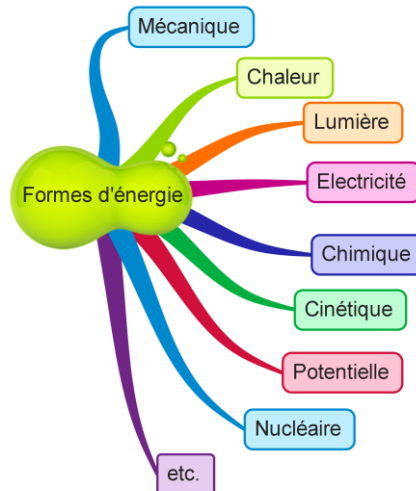


Figure 2. Quelques exemples de formes d'énergie.

On dit souvent qu'un système possède de l'énergie s'il peut fournir du travail ou de la chaleur. Il peut aussi fournir d'autres formes d'énergie utiles aux usages humains. Par exemple, une pile peut générer de l'énergie électrique, grâce à une transformation chimique, pour alimenter une ampoule qui fournira de l'énergie lumineuse permettant d'éclairer.

Un avion de 130 tonnes volant à 900 km/h a une énergie cinétique de 1 100 kWh soit 1,1 MWh. C'est l'énergie contenue dans un peu moins d'une tonne de TNT. Une voiture de 1,2 tonne roulant à 130 km/h n'a une énergie que de 0,2 kWh.

Une bonne source d'énergie doit être facilement accessible, peu coûteuse et respectueuse de l'environnement. Ces conditions sont satisfaites à des degrés divers, le coût étant très souvent le critère privilégié.

Transformations énergétiques

La plupart du temps il est nécessaire de transformer une forme d'énergie en une autre directement utilisable par le consommateur. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de transformation.

Forme d'énergie initiale	Système de transformation	Forme d'énergie finale
Énergie solaire	Chauffe-eau solaire	Chaleur
Énergie solaire	Panneau photovoltaïque	Électricité
Essence	Moteur à combustion interne	Énergie mécanique
Charbon	Centrale thermique	Électricité
Hydrogène	Pile à combustible	Électricité
Uranium	Réacteur nucléaire	Électricité

Tableau 1. Exemples de passage d'une forme d'énergie à une autre.

Le passage d'une forme d'énergie à une autre se fait toujours avec un rendement inférieur à 100 %. Un des objectifs est de rendre aussi faibles que possible les pertes qui ont lieu lors des transformations énergétiques afin d'utiliser au mieux la source d'énergie de départ. Ainsi, pour le piston d'un cylindre de moteur à combustion interne, on essaye de réduire au maximum la friction entre le métal du piston et la paroi de la chambre. Il existe toutefois des pertes incontournables résultant des lois physiques gouvernant la nature. La **loi de Carnot** en est un exemple.

Source d'énergie

Une **source d'énergie** permet, par transformation, de générer une forme d'énergie utilisable par le consommateur. Des morceaux de bois sont par exemple une source d'énergie. Si on les fait brûler dans une cheminée ils vont produire de la chaleur qui peut servir à chauffer une maison. L'essence contenue dans le réservoir d'un véhicule est une source d'énergie : sa combustion dans le moteur va permettre à celle-ci de se mouvoir sur la route et de transporter des passagers et des marchandises. Une source d'énergie est dite **primaire** si c'est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. C'est le cas du pétrole brut, par exemple.

Vecteurs énergétiques

Un **vecteur énergétique** permet de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre mais il faut de l'énergie pour le produire. L'électricité est le vecteur énergétique le plus connu. On la produit à partir de différentes sources d'énergie (gaz naturel, nucléaire, hydraulique, éolien, etc.) avant de l'acheminer vers le consommateur. L'hydrogène est également un vecteur énergétique : il faut de l'énergie pour le fabriquer mais on peut le transporter d'un endroit à un autre.

On distingue généralement le vecteur énergétique de la source d'énergie mais certaines (pétrole, gaz naturel, etc.) permettent également de transporter de l'énergie d'un point à un autre car elles contiennent intrinsèquement cette énergie.

Puissance

La **puissance** d'un système est l'énergie qu'il peut fournir par unité de temps. La puissance se mesure en watt. On a 1 watt = 1 joule/s et 1 kW = 1 000 W. Il ne faut pas confondre 1 kW, qui est une puissance, et 1 kWh, qui est une quantité d'énergie. 1 kWh est par exemple l'énergie fournie par un système dont la puissance est de 1 kW fonctionnant sans interruption pendant une heure. C'est le cas d'un radiateur électrique de 1 000 W placé dans une pièce froide qui fonctionne à pleine puissance pendant une heure.

L'énergie contenue dans l'essence est d'environ 42-43 MJ/kg soit $\approx 11,5-12$ kWh/kg. Celle contenue dans 1 kg de TNT, un puissant explosif, n'est que de 4,6 MJ/kg (1,3 kWh/kg), soit 10 fois moins. Pourtant l'explosion d'un kilogramme de TNT est beaucoup plus destructrice que la combustion d'un litre d'essence. C'est parce que l'énergie peut être libérée dans un temps très court conduisant à une grande puissance. S'il faut par exemple 6 litres d'essence à une voiture pour parcourir 100 km à vitesse constante, la puissance libérée par le carburant est de 60 kW. Si l'on fait brûler 6 litres d'essence en 1 minute, la puissance libérée sera de 3,6 MW = 3 600 W. L'énergie libérée lors de l'explosion de la bombe atomique de Hiroshima était la même que celle contenue dans 23 300 m³ d'essence mais celle-ci a été libérée pendant un temps très bref, donc avec une énorme puissance. De même, l'Amocco Cadiz,

pétrolier qui s'est échoué en 1978 sur les côtes bretonnes, contenait dix fois l'énergie libérée lors de l'explosion nucléaire de Hiroshima.

3. Des lois physiques incontournables

Augmenter les rendements de transformation d'une forme d'énergie à une autre est un objectif prioritaire car cela revient à faire baisser le prix de l'énergie nécessaire à un usage et diminue la quantité d'énergie primaire consommée. Dans le cas où il s'agit de sources d'énergie en quantité finie, comme le pétrole par exemple, cela permet d'économiser le stock. Il existe toutefois des lois physiques qui limitent certains rendements et il est impossible de les violer.

Travail et chaleur

Le **travail** et la **chaleur** sont deux manifestations extrêmes de l'énergie. Lorsque nous soulevons un objet nous fournissons du travail pour le faire. Lorsque nous chauffons une casserole remplie d'eau, nous fournissons de la chaleur. La thermodynamique est la science dont le but principal est de décrire les transformations entre ces deux formes d'énergie.

Le travail est une forme noble d'énergie. Il permet aux véhicules de se déplacer, aux machines d'effectuer des tâches utiles à l'homme. La chaleur est au contraire la forme la plus dégradée de l'énergie. On caractérise la chaleur contenue dans un système par sa **température**. La chaleur a une valeur économique d'autant plus élevée que la température du système est élevée. En effet, avec une source de chaleur à haute température on peut, en l'associant à une source de chaleur à la température ordinaire, produire du travail ou une forme d'énergie noble comme de l'électricité. Un système à la température d'une trentaine de degrés Celsius a aussi une valeur économique mais plus difficilement exploitable.

Les principes de la thermodynamique

Les principes de la thermodynamique gouvernent les échanges énergétiques.

Le **premier principe de la thermodynamique** dit que **l'énergie totale d'un système isolé est conservée**. Ainsi, si l'on produit 3 kWh d'énergie en « brûlant » de l'uranium dans un réacteur nucléaire à eau sous pression (réacteurs actuels français), on produit 1 kWh d'électricité et 2 kWh de chaleur. Ces derniers ne sont pas pour le moment utilisés et relâchés dans l'environnement. L'énergie initiale se répartit donc en électricité et chaleur mais la somme des deux est égale à l'énergie initiale.

Le premier principe équilibre le bilan énergétique d'une transformation mais ne dit pas si celle-ci est possible. Prenons pour illustrer ceci le cas d'un système isolé (une bouteille thermos, par exemple). Si on mélange initialement de l'eau chaude et de l'eau froide le mélange, après équilibre, sera de l'eau tiède : l'eau chaude s'est refroidie et l'eau froide réchauffée. Ces échanges de chaleur se font en conservant l'énergie totale du système global. On pourrait imaginer qu'en partant d'eau froide dans la thermos on puisse former des glaçons et de l'eau chaude. Si la loi de conservation de l'énergie est satisfaite, rien ne s'oppose en principe à une telle transformation. On sait qu'elle n'est pas possible car il faut tenir compte du **second principe de la thermodynamique**. Celui-ci a plusieurs énoncés selon l'aspect auquel on s'intéresse.

L'énoncé de Clausius dit que, **pour un système isolé, il n'est pas possible de transférer de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud**. On ne peut transférer de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud que dans le cas d'un système non isolé (ouvert) en fournissant du

travail. Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur sont des systèmes non isolés qui consomment de l'électricité pour fournir du travail permettant de faire passer la chaleur d'une source froide vers une source chaude (pompe à chaleur) ou le froid d'une source chaude vers une source froide (réfrigérateur).

L'énoncé de Kelvin-Planck s'intéresse à la production de travail. Il dit **qu'il n'existe pas de transformation dont le seul résultat soit de produire du travail à partir d'une seule source de chaleur à température constante**. C'est la raison pour laquelle les centrales thermiques produisant de l'électricité ont besoin d'une source chaude et d'une source froide. La loi de Carnot donne le rendement maximum en travail que l'on peut obtenir à partir d'un système constitué d'une source chaude et d'une source froide. Ainsi, pour une source chaude à 300 °C et une source froide à 20 °C, le rendement maximal que l'on peut obtenir est de 52 %. Cela suppose que le système travaille de manière réversible, ce qui n'est pas le cas pour systèmes réels, sans autres pertes de rendement. Dans la pratique (cette gamme de température correspond à peu près à celle des réacteurs nucléaires utilisés en France) le rendement est plutôt de 33 %. De manière générale, plus la différence de température entre la source chaude et la source froide augmente, plus le rendement en travail augmente.

L'entropie

L'entropie mesure l'état de désordre d'un système. Elle augmente avec celui-ci. Une autre formulation importante du second principe de la thermodynamique est que **l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter**. Elle ne reste constante que dans des processus réversibles qui sont rares pour les systèmes réels. L'entropie de l'univers augmente dès qu'un processus irréversible a lieu. L'évolution irréversible d'un système isolé ne peut se produire que vers des états microscopiques de plus en plus désordonnés. C'est la raison pour laquelle, en biologie, on dit souvent que lorsque l'entropie augmente, l'énergie de « **dégrade** » car elle se répartit sur un plus grand nombre de degrés de liberté.

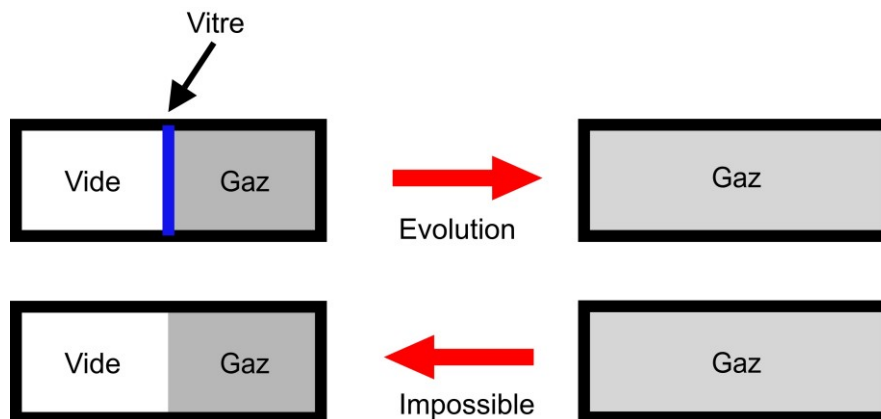


Figure 1. Dans la partie haute de la figure, l'évolution de gauche à droite est irréversible et l'entropie du système augmente. Dans la partie basse de la figure il n'est pas possible, spontanément, d'avoir toutes les molécules du gaz dans la partie droite du récipient. Cela correspondrait à une diminution de l'entropie.

Prenons l'exemple schématisé sur la figure 1 dans lequel, initialement, un récipient est divisé en deux parties séparées par une vitre (schéma en haut à gauche). On suppose la partie droite remplie de gaz et la partie gauche sous vide. Si on casse la vitre, le gaz occupe spontanément tout le volume du récipient. On a une évolution irréversible du système avec augmentation de son entropie. Par contre, dans le bas de la figure 1, il n'est pas possible, spontanément, que toutes les molécules de gaz enfermées dans le récipient occupent seulement

une moitié de celui-ci. Cela correspondrait à une diminution de l'entropie ce qui est impossible. Pour pouvoir le faire, il faudrait que l'une des parois soit un piston qui force les molécules à n'être que dans la partie droite. Le système ne serait plus isolé et il faudrait fournir du travail pour réaliser cette transformation.

En deux mots

Il faut admettre qu'il existe des **lois physiques** que l'on ne peut violer. Ce sont celles qui décrivent notre monde. Ce ne sont pas des lois que l'on peut changer à la demande ou faire revoter comme certains le pensent. Il faut tenir compte des lois de la physique dans toute évaluation faite dans le domaine de l'énergie.

4. Les Unités

Dans le système international l'unité d'énergie est le **joule** (J). C'est une toute petite quantité d'énergie. Pour donner un ordre de grandeur, c'est l'énergie dépensée lorsque l'on frappe une cinquantaine de fois le clavier d'un ordinateur. Comparé à nos besoins usuels c'est microscopique.

On utilise souvent des multiples d'unité. Les principaux préfixes utilisés sont indiqués dans le tableau 1. On a ainsi :

$$1 \text{ EJ} = 10^3 \text{ PJ} = 10^6 \text{ TJ} = 10^9 \text{ GJ} = 10^{12} \text{ MJ} = 10^{15} \text{ PJ} = 10^{18} \text{ J}$$

Préfixe	Facteur multiplicatif	Symbole
Kilo	10^3	k
Méga	10^6	M
Giga	10^9	G
Téra	10^{12}	T
Pecta	10^{15}	P
Exa	10^{18}	E

Tableau1

Dans le passé, on a longtemps utilisé la **calorie** (cal) qui est la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau d'un degré Celsius, de 14,5 °C à 15,5 °C, sous une pression atmosphérique de 1 bar. On a la relation :

$$1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$$

La **Calorie**, ou grande calorie, utilisée en diététique vaut 1 kilocalorie, soit 1 000 calories. Donc $1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal} = 4\,185,5 \text{ J}$.

Dans le secteur électrique, on utilise souvent le **kilowattheure** (kWh). C'est la quantité d'énergie consommée par un appareil de 1 000 W (1 kW) fonctionnant pendant 1 heure. On a :

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

1 kWh est une quantité d'énergie importante comme l'illustre la figure 1 sur quelques exemples. La consommation moyenne d'électricité d'un ménage, hors chauffage et eau chaude, est de 2 700 kWh/an, soit environ 7 kWh/jour. Pour un logement, la consommation électrique pour produire de l'eau chaude est de l'ordre de 2 000 kWh/an. La consommation électrique française actuelle est d'environ 500 TWh par an.

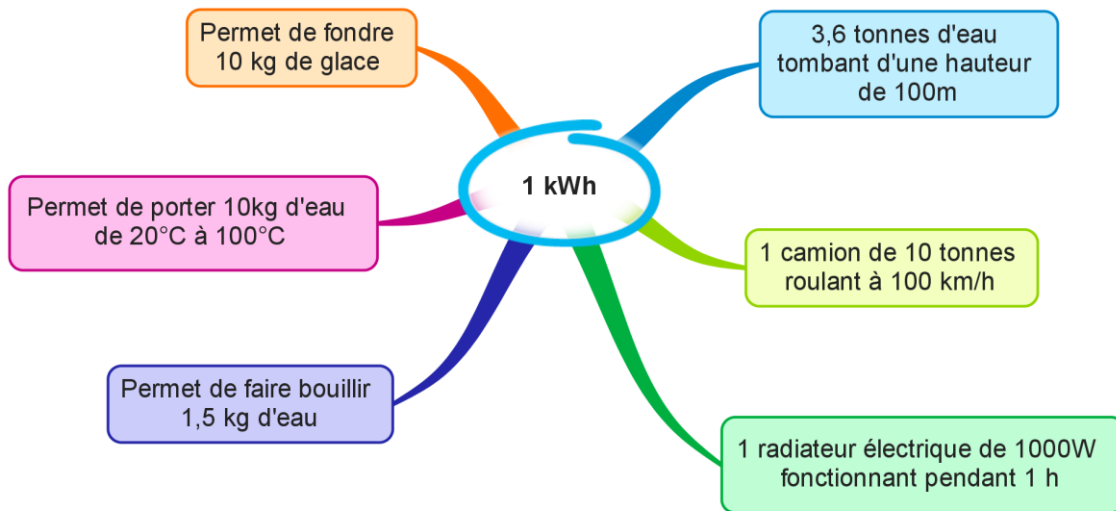


Figure1. Quantité d'énergie que représente 1 kWh sur quelques exemples.

Une unité souvent utilisée dans le domaine de l'énergie par les économistes est la **tonne équivalent pétrole**. C'est l'énergie calorifique contenue dans une tonne de pétrole « moyen » (il en existe de différentes qualités). C'est une unité qui permet de comparer différentes formes d'énergie de manière approchée. Elle est définie par :

$$1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ} \text{ ou } 1 \text{ MWh} = 0,086 \text{ tep} \text{ ou } 1 \text{ tep} = 11,6 \text{ MWh}$$

1 tonne de houille vaut, par exemple, 0,62 tep et une tonne de lignite 0,4 tep. Pour ce qui de l'électricité, le facteur de conversion dépend de la source utilisée car on tient compte du rendement de production à partir de la source d'énergie primaire. Le coefficient de conversion est par exemple $1 \text{ MWh} = 0,036 \text{ tep}$ pour l'énergie nucléaire et $1 \text{ MWh} = 0,86 \text{ tep}$ pour la production d'électricité d'origine géothermique.

On entend souvent parler du **baril de pétrole** (bbl, pour « blue barrel », car les barils de pétrole étaient, à la fin du XIX^e siècle, de couleur bleue). On a :

$$1 \text{ bbl} = 159 \text{ litres} \text{ et } 1 \text{ tep} = 7,33 \text{ bbl}$$

On trouvera également d'autres unités utilisées dans la littérature et l'internet anglo-saxons. Le **Btu (British thermal unit)** est l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'une livre anglaise d'eau de 1 degré Fahrenheit. On a :

$$1 \text{ Btu} \approx 1 \text{ kJ}$$

À partir de cette unité, on utilise aussi souvent, aux États-Unis, le **quad** (10^{15} Btu, quadrillion Btu).

Le tableau 2 donne quelques facteurs de conversion entre différentes unités.

	EJ	TJ	MJ	TWh	kWh	Mtep	Gtep
1 EJ =	1	10^6	10^{12}	278	$2,78 \times 10^{11}$	23,9	$23,9 \times 10^{-3}$
1 TJ =	10^{-6}	1	10^{-3}	278×10^{-6}	278×10^3	$23,9 \times 10^{-6}$	$23,9 \times 10^{-9}$
1 MJ =	10^{-12}	10^{-6}	1	278×10^{-12}	0,278	$2,4 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-14}$
1 TWh =	$3,6 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^3$	$3,6 \times 10^9$	1	10^9	$8,6 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-5}$
1 kWh =	$3,6 \times 10^{-12}$	$3,6 \times 10^{-6}$	3,6	10^{-9}	1	$8,6 \times 10^{-11}$	$8,6 \times 10^{-14}$
1 Mtep =	0,042	42×10^3	42×10^9	11,6	$11,6 \times 10^9$	1	10^{-3}
1 Gtep =	42	42×10^6	42×10^{12}	$11,6 \times 10^3$	$11,6 \times 10^{12}$	10^3	1

Tableau 2. Ce tableau se lit horizontalement. Il exprime quelques unités d'énergie en d'autres unités.

5. De l'énergie primaire à l'énergie utile

En économie, en technologie ou dans la vie courante on désigne sous le terme d'énergie des formes qui sont souvent différentes. Ceci permet parfois à certains interlocuteurs de mettre en avant des arguments fallacieux ou de comparer des choses qui ne le sont pas pour défendre un point de vue partisan. Dans le domaine énergétique, on parle souvent d'énergie primaire, d'énergie secondaire, d'énergie finale et d'énergie utile.

L'énergie primaire est l'énergie avant toute transformation. C'est celle qui est disponible à l'état brut comme le charbon, le pétrole brut, le gaz naturel, l'uranium, le vent, le flux solaire, etc. Les statistiques énergétiques concernent en premier lieu cette énergie primaire qui est souvent celle que l'on importe ou produit dans le pays. On parle de production et de consommation d'énergie primaire. Parfois, bien qu'il y ait eu transformation, on parle de l'électricité produite par une éolienne, un panneau solaire ou un barrage comme d'une énergie primaire.

L'énergie secondaire est obtenue à partir de l'énergie primaire par une transformation. L'uranium, consommé dans un réacteur nucléaire va par exemple produire de l'électricité au niveau de la centrale.

L'énergie finale est celle qui est vendue au consommateur après transformation de l'énergie primaire. Dans de nombreux cas elle peut être identique à l'énergie secondaire. Par exemple, par raffinage du pétrole brut on peut obtenir de l'essence ou du diesel. Ces énergies secondaires sont aussi l'énergie finale achetée par le consommateur à la pompe. Parfois, l'énergie finale nécessite une étape de plus que l'énergie secondaire. Dans le cas de l'électricité produite par une centrale thermique à charbon ou nucléaire, l'électricité produite par la centrale doit être acheminée vers le consommateur par des lignes haute, moyenne et basse tension. Ce transport consomme de l'énergie et la quantité d'électricité finale est un peu inférieure à celle produite dans la centrale.

L'énergie utile est celle qui sert vraiment à l'usage auquel elle est destinée. Dans le cas de l'essence utilisée par le moteur à combustion interne d'une voiture, l'énergie utile est celle qui permet de propulser le véhicule, soit de l'ordre 15-30 % de l'énergie contenue dans l'essence.

Pour proposer des solutions à un problème, il est préférable que ce problème soit posé clairement. Ce n'est pas le cas du problème complexe de l'énergie ; son utilisation réelle ne fait l'objet d'aucune évaluation officielle ! C'est cependant le besoin réel d'énergie correspondant au mode de vie mondial actuel qui est important. Ce dernier est très mal représenté par les deux références usuelles : « énergie Primaire » et « énergie Finale ». Leur valeur peut être le double, le triple et parfois le décuple dans l'utilisation réelle et elles sous-estiment beaucoup l'intérêt des énergies renouvelables comme le montre l'analyse ci-dessous. Nous allons revenir sur ces notions et proposer une évaluation sans doute mieux adaptée aux études prospectives dans le domaine de l'énergie.

L'énergie primaire

Comme nous l'avons dit plus haut, c'est l'énergie contenue à l'état naturel dans les sources d'énergie utilisées par l'homme. Sa consommation globale annuelle est évaluée officielle-

ment à 13,5 Ttep, c'est-à-dire à 155 000 TWh¹. Cela représente 22,000 kWh en moyenne pour chacun des 7 milliards d'habitants de la planète. Nous utiliserons ci-dessous le kWh ou ses multiples car c'est une unité plus parlante pour les non-spécialistes.

L'énergie Primaire s'évalue suivant la définition ci-dessus pour les énergies fossiles et la biomasse ; elle inclut les pertes correspondantes qui peuvent être très importantes, notamment dans les centrales électriques, moteurs, foyers. En moyenne l'« énergie primaire » fossile est de l'ordre de trois fois l'énergie fossile réellement utilisée et ce coefficient varie d'un à dix suivant la source et l'utilisation.

Pour l'hydroélectricité, l'énergie éolienne ou photovoltaïque, on ne compte comme énergie primaire que l'énergie électrique produite qui est proche de l'énergie réellement utilisée, ce qui minimise beaucoup le rôle actuel ou potentiel de ces énergies, qui seront importantes dans le futur. Par contre, si l'on parlait de l'énergie solaire arrivant sur un panneau photovoltaïque ou l'énergie cinétique du vent frappant les pales d'une éolienne, le rendement serait beaucoup moins bon.

Pour l'énergie nucléaire, il serait logique d'utiliser le même critère que pour les autres énergies fossiles mais l'énergie primaire réelle de l'uranium consommé annuellement est de plus d'un million de TWh ! Un autre calcul pourrait être identique à celui de l'hydroélectricité et l'importance du nucléaire apparaîtrait alors de 3 000 TWh. On admet donc par convention une énergie primaire nucléaire trois fois supérieure à l'électricité produite. Cette convention explique en particulier qu'en énergie primaire le nucléaire est environ trois fois plus important que l'hydraulique alors qu'en électricité produite, le nucléaire et l'hydraulique produisent à peu près la même quantité.

L'« énergie primaire » ainsi calculée est très supérieure à l'énergie utilisée par un coefficient très variable suivant la source et l'emploi. Représentant mal les besoins, c'est un critère inadapté aux études prospectives envisageant un changement important des sources d'énergie.

L'énergie finale

Comme nous l'avons dit plus haut, l'énergie finale est l'énergie mise à disposition des utilisateurs, par exemple sous forme d'électricité, de gaz naturel ou d'essence. Son évaluation globale officielle est de 9 milliards de tep, c'est-à-dire environ 105 000 TWh, soit les 2/3 de l'« énergie primaire ».

La différence de 50 000 TWh avec l'« énergie primaire » correspond principalement aux pertes dans les centrales électriques : on n'en tient pas compte dans l'énergie finale électrique qui est donc assez proche de l'énergie électrique réellement utilisée.

Mais le nom d'« énergie finale » est une grave source de confusion, car, en dehors de l'électricité où son utilisation se fait avec un bon rendement, l'« énergie finale » comprend des pertes très importantes voisines de celles de l'énergie primaire. Elle reste ainsi supérieure d'un coefficient très important et variable à l'énergie réellement utilisée. Ce critère donne donc une importance injustifiée aux énergies qui comportent les plus grandes pertes comme le pétrole pour le transport ou le bois en Asie et en Afrique. Il attribue aux transports 30 % de l'énergie alors que leur besoin réel est inférieur à 20 %. Et il attribue à l'électricité une part inférieure à 20 % alors qu'un tiers de l'énergie utilisée réellement est sous forme

¹ 1 MWh = 0,086 tep

électrique. Comme l'hydroélectricité, le photovoltaïque et l'éolien fournissent directement de l'électricité qui est alors considérée comme énergie primaire, le rôle de ces sources est minimisé dans la contribution énergétique utilisée au niveau de la planète.

L'« énergie finale » représente donc mal les besoins actuels et futurs et son utilisation pour des études prospectives à long terme peut être une grave cause d'erreurs.

L'énergie utile

99 % de l'énergie primaire peut être répartie entre six sources : pétrole, charbon, gaz, biomasse, nucléaire, énergies du soleil (hydro, photovoltaïque, éolien).

Pour 2011, d'après les données de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE, www.iea.org), les chiffres se répartissent, en milliers de TWh pour un total de 153 000 TWh (153 PWh), selon le tableau 1.

Pétrole	Charbon	Gaz	Biomasse	Nucléaire	Hydraulique Éolien Photovoltaïque
48 PWh	44 PWh	33 PWh	15 PWh	8 PWh	5 PWh

Tableau 1. Énergie primaire des différentes sources au niveau mondial, en PWh, pour l'année 2011. Source des données www.iea.org.

On peut évaluer sommairement l'énergie réellement utilisée en déduisant les pertes diverses d'énergie primaire estimées pour chaque source :

Ces pertes sont faibles, de 10 à 20 % pour l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque, fournies et évaluées sous forme électrique, d'où une énergie utilisée de 4 000 TWh.

Le mode d'évaluation de l'énergie primaire nucléaire correspond à une utilisation réelle de l'ordre de 0,3 x 8 000 soit 2 500 TWh d'électricité.

Pour la biomasse, les pertes sont très importantes, près de 90 % pour l'utilisation principale de la biomasse en Asie et en Afrique. Elles sont plus réduites (40 %) dans les autres pays. En prenant une moyenne de 70 %, cela conduit à une utilisation réelle de l'ordre de 30 % x 15 000 soit 4 500 TWh.

Pour le pétrole, l'utilisation réelle est d'environ 30 % de l'énergie primaire pour la part (15 %) utilisée sous forme d'électricité, 25 % pour la part (50 %) utilisée directement dans le transport, 0 % pour la part (15 %) non utilisée pour l'énergie, 60 % pour la part (20 %) utilisée dans l'industrie et divers soit : $48\,000\text{ TWh} \times [0,3 \times 0,15 + 0,25 \times 0,5 + 0,6 \times 0,2] = 29\% \times 48\,000 = 14\,000\text{ TWh}$.

Le charbon est utilisé à 75 % pour produire de l'électricité et pour 25 % essentiellement dans l'industrie. L'utilisation réelle est de $44\,000\text{ TWh} \times [0,75 \times 0,3 + 0,25 \times 0,6] = 16\,500\text{ TWh}$.

Le gaz naturel est utilisé pour 10 % hors du domaine de la production d'énergie, pour 40 % pour produire de l'électricité avec 70 % de pertes, et pour 50 % principalement pour l'industrie avec 40 % de pertes. L'énergie utilisée est de $33\,000\text{ TWh} \times [0,4 \times 0,3 + 0,5 \times 0,6]$, soit de 15 500 TWh.

Le tableau 2 compare l'énergie primaire et l'énergie réellement utilisée (énergie utile) pour différentes sources. Ce tableau indique aussi l'énergie finale calculée de manière analogue.

Sources d'énergie	Énergie Primaire	Énergie Finale	Énergie utile
- Pétrole	48	43	14
- Charbon	44	18	16,5
- Gaz	33	20	15,5
- Biomasse	15	14	4,5
- Nucléaire	8	3	2,5
- Hydro, PV, Éolien...	5	5	4
Total	153	103	57

Tableau 2. Énergie mondiale en 2011 (en PWh (milliers de TWh))

Les coefficients utilisés dans les calculs ci-dessus peuvent être affinés par des études détaillées mais cela ne changerait pas l'ordre de grandeur et les conclusions.

La figure 1 montre la répartition des différentes sources d'énergie en tenant compte de la quantité réellement utilisée.

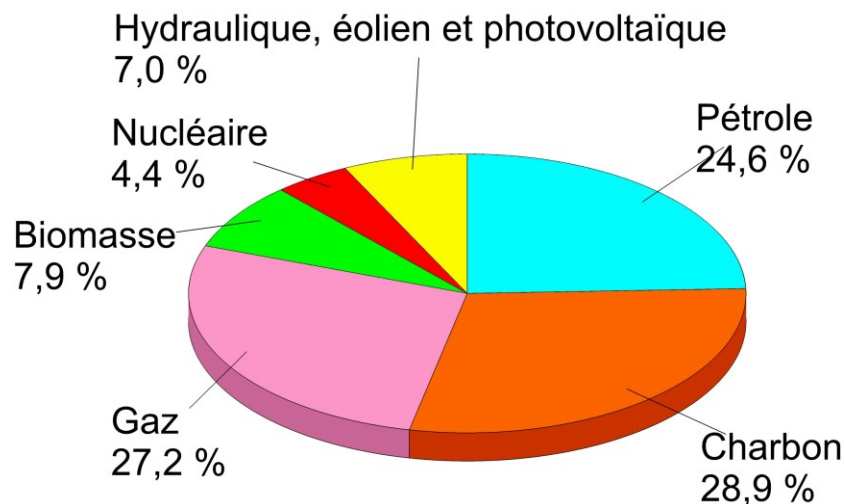


Figure 1. Répartition de l'énergie réellement utilisée (énergie utile) selon les différentes sources (2011).

En deux mots

L'énergie réellement utilisée actuellement (c'est-à-dire le besoin réel) n'est qu'environ le tiers de l'« énergie primaire » et la moitié de ce qu'on appelle à tort l'« énergie finale ».

L'énergie primaire et l'énergie finale minimisent beaucoup le rôle actuel et le potentiel des énergies renouvelables : hydraulique, éolien, photovoltaïque.

Le critère de l'énergie finale surestime le poids du transport ainsi que le rôle du pétrole et de la biomasse. Il sous-estime beaucoup la part de l'électricité qui fournit dans les faits un tiers de l'énergie utilisée au niveau de la planète.

C'est la connaissance de l'énergie réellement utilisée, c'est-à-dire des besoins liés au mode de vie, qui peut le mieux servir de base aux études prospectives, même si son évaluation ne peut être très précise.

Cette énergie utile est actuellement proche de 8 000 kWh en moyenne pour 7 milliards d'habitants. On a :

- 15 000 kWh en moyenne pour 3 milliards d'habitants des Pays du Nord (essentiellement O.C.D.E. et Chine) ;
- 3,000 kWh en moyenne pour 4 milliards d'habitants des Pays du Sud.

Le produit intérieur brut (richesse) et l'émission de CO₂ par habitant sont également en moyenne cinq fois plus élevés dans les Pays du Nord que dans ceux du Sud, mais le ratio peut atteindre 100 entre les pays extrêmes.

Le raisonnement fait ici ne s'intéresse qu'à la quantité d'énergie. Un autre problème tout aussi important est celui de sa disponibilité. Or c'est un problème majeur pour les énergies renouvelables intermittentes comme l'éolien ou le solaire qui ne sont pas toujours disponibles (lorsqu'il n'y a pas de vent ou pas de soleil) et dont la pleine puissance n'est pas non plus modulable à volonté (force du vent, intensité solaire (nuages, par exemple ou heure de la journée)). Seule l'hydraulique permet, lorsque la retenue est pleine, de fournir de l'énergie à la demande.

Les rendements actuels pour le passage entre l'énergie primaire et l'énergie utile sont pour beaucoup tributaires de la technologie utilisée et de la physique mise en jeu lors de son utilisation (principe de Carnot pour les machines thermiques, par exemple). Dans ce cas il faut envisager de nouvelles technologies permettant d'obtenir des pertes plus faibles entre l'énergie primaire et l'énergie utile.

6. La domination des énergies fossiles

Le niveau de vie des gens est dans une large mesure corrélé à la quantité d'énergie à laquelle ils ont accès à un prix raisonnable. Un minimum est nécessaire pour vivre convenablement. Beaucoup de personnes des pays développés pensent qu'il est naturel d'avoir l'électricité dans la maison et de pouvoir faire le plein de la voiture lorsque l'on en a besoin. Cette facilité d'accès à l'énergie n'existe pas dans certains pays où cette commodité reste encore un luxe. Sur les 7 milliards d'habitants de la planète, environ 1 milliard de personnes vivent avec moins de 1 \$ par jour et presque 3 milliards avec moins de 2 \$ par jour. De plus, 1,2 milliard d'habitants n'ont pas encore accès à l'électricité.

D'où vient l'énergie ?

La plupart des sources d'énergie que l'on utilise pour nos besoins ont pour origine l'énergie solaire directe ou indirecte. C'est le cas des combustibles fossiles (charbon, pétrole brut et gaz naturel) qui ont été synthétisés par nature il y a des centaines de millions d'années à partir de la biomasse, de l'eau et du gaz carbonique. C'est également le cas de la plupart des énergies renouvelables excepté l'énergie géothermique. Cette dernière a pour principale origine la chaleur dégagée par les noyaux radioactifs naturels contenus dans le sol, le reste provenant de la chaleur originelle de la terre produite lors de sa formation. Les éléments radioactifs naturels présents dans la terre provenaient des débris d'étoiles en fin de vie. Le Système solaire s'est formé, il y a environ 4,5 milliards d'années, à partir de ces poussières. La géothermie est une source d'énergie inépuisable à l'échelle humaine plutôt que renouvelable. L'énergie nucléaire utilise aujourd'hui l'uranium et utilisera peut-être demain le thorium, deux radioéléments formés dans les étoiles. Avec des technologies modernes, il est également possible d'exploiter la chaleur de basse température pour produire de la chaleur ou du froid avec des pompes à chaleur. Par conséquent, la chaleur de basse température est une source d'énergie importante pour l'avenir.

Évolution de la consommation

La consommation d'énergie mondiale augmente régulièrement pour deux raisons principales :

- La première vient de l'augmentation de la population mondiale. Il y a chaque jour 200 000 nouveaux habitants sur la terre qui sont des consommateurs supplémentaires d'énergie. Depuis le début de la révolution industrielle, il y a un peu plus de deux siècles, la croissance de la population mondiale a été rapide comme on peut le voir sur la figure 1. Cette augmentation s'est traduite par une augmentation de la consommation d'énergie de la même manière que plus de convives requièrent plus de nourriture.
- Le niveau de vie des populations des pays émergents ou en développement augmente régulièrement ce qui a pour conséquence d'augmenter la consommation d'énergie au niveau de la planète.

Ces deux facteurs expliquent pourquoi le monde a de plus en plus besoin d'énergie.

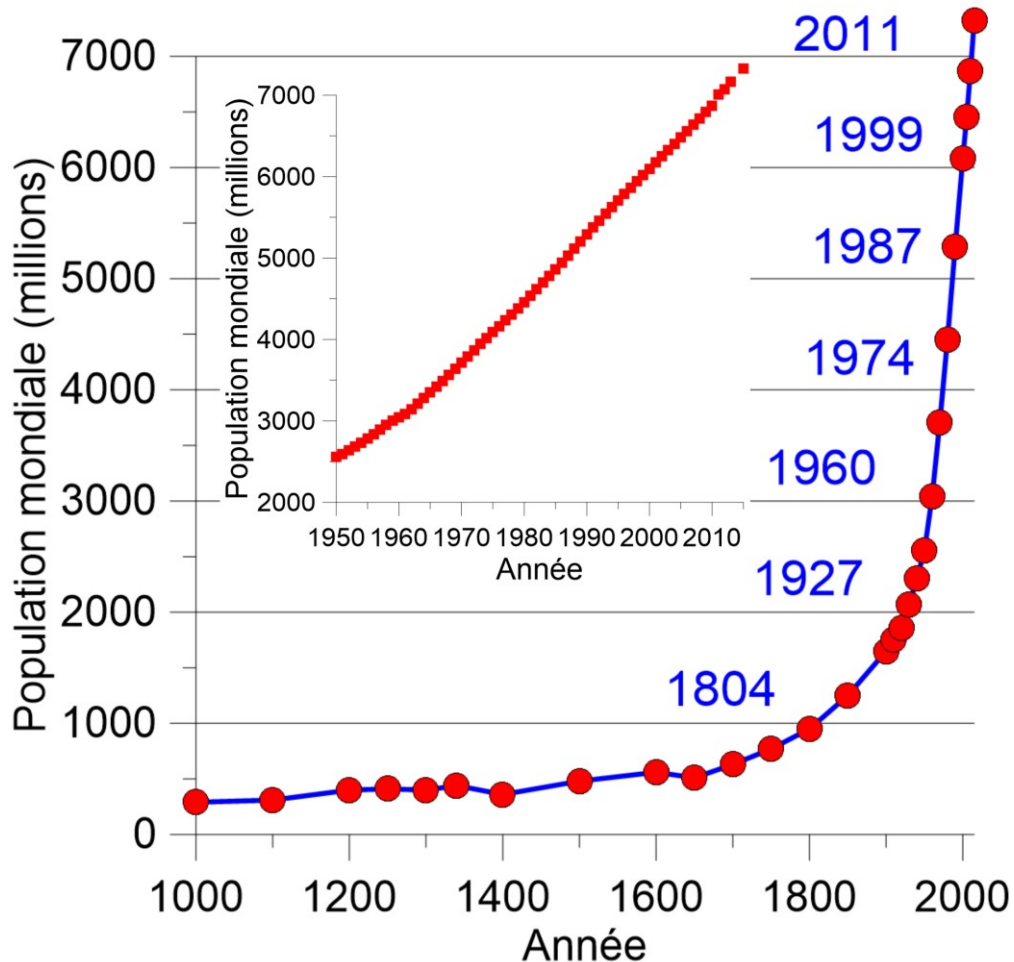


Figure 1. Évolution de la population mondiale des années mille à nos jours. Les chiffres en bleu (1804, 1927...) indiquent les années où il y a eu un milliard d'habitant en plus. La figure encadrée en haut à gauche montre l'évolution de la population mondiale depuis 1950.

Quelles sources d'énergie ?

L'homme a commencé à utiliser manières volontaires des sources d'énergie lorsqu'il a maîtrisé le feu, il y a environ 500 000 ans. Jusqu'à la révolution industrielle, les besoins énergétiques ont été satisfaits par la force humaine, animale ou les énergies renouvelables. La majeure partie de l'histoire humaine a donc été dominée par des énergies renouvelables. Même si on les qualifie parfois aujourd'hui d'énergies nouvelles, ce sont en fait des énergies anciennes que l'on essaie aujourd'hui de mieux exploiter.

La possibilité d'accéder à des sources d'énergie bon marché a toujours été un avantage au cours des âges. La révolution industrielle, qui a commencé au XVIII^e siècle, a été stimulée par une utilisation importante du charbon comme source d'énergie. Le charbon, puis le pétrole et le gaz naturel ont permis, par leur abondance, leur faible coût et leur densité énergétique importante, un accroissement considérable du niveau de vie soit directement (production d'électricité, de chaleur, de lumière, de froid, etc.) soit indirectement (progression du confort, de la technologie, de la médecine, etc.). Plus récemment, l'utilisation de l'énergie nucléaire, fortement concentrée et non émettrice de CO₂, a permis de produire de l'électricité dans les pays technologiquement avancés.

La domination des combustibles fossiles

La figure 2 montre la consommation d'énergie primaire selon les différentes sources pour l'année 2012. On constate que **le pétrole, le gaz naturel et le charbon représentent encore plus de 80 % de l'énergie consommée sur la planète par l'humanité**. Parmi les énergies renouvelables, l'hydraulique et la biomasse ont la plus grande contribution, la première pour produire de l'électricité avec un bon rendement, la seconde pour produire surtout de la chaleur, souvent avec un mauvais rendement. De plus, dans beaucoup de pays, le bois n'est pas une ressource renouvelable dans la mesure où l'on ne replante pas d'arbres pour remplacer ceux que l'on a abattus.

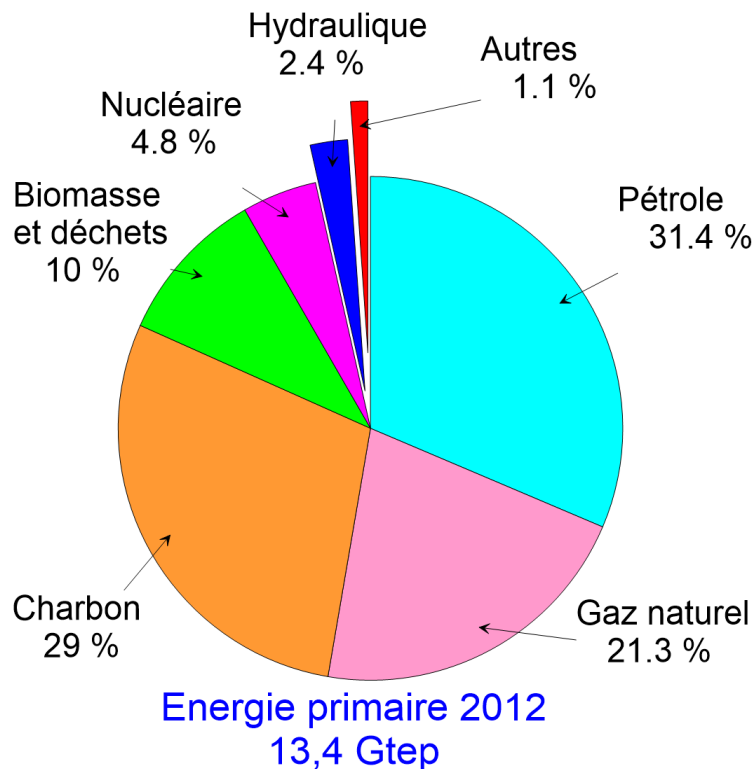


Figure 2. répartition de l'énergie primaire en fonction des différentes sources d'énergie. Source des données www.iea.org.

D'ici 2050 il est très difficile de se passer complètement des combustibles fossiles, contrairement à ce que certains essaient de faire croire. L'objectif qu'il faut se donner est de réduire progressivement cette dépendance au profit d'autres sources d'énergie. Il faut toutefois garder en mémoire les différences énormes existant dans les densités d'énergie des différentes sources. Très grossièrement, on peut dire, que si l'on prend comme référence le pétrole, l'énergie nucléaire est un million de fois plus concentrée alors que les énergies renouvelables sont un million de fois moins concentrées. Pour satisfaire les besoins d'un homme moderne, qui sont bien supérieurs à ceux de nos ancêtres, les énergies renouvelables, qui ont une densité d'énergie faible dans la nature, doivent être concentrées pour pouvoir être utilisables.

En deux mots

Depuis plusieurs décennies les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) représentent environ 80 % de l'énergie primaire consommée au niveau de la planète malgré de nombreux efforts pour réduire cette proportion. Il est peu probable, dans les décennies qui viennent, que les combustibles fossiles disparaissent complètement ou que leur contribution soit très faible. Cela aurait des répercussions bien trop importantes sur l'économie avec une augmentation notable de la pauvreté au niveau de la planète. Il est important de peu à peu les remplacer mais cela doit se faire avec précaution en tenant compte de l'effet que cela peut avoir sur les populations les plus pauvres. En 2050, il est fort probable que les combustibles fossiles représentent encore 60 à 65% de l'énergie primaire consommée dans le monde.

7. Énergie et espérance de vie

L'énergie est indispensable au développement économique. Elle permet de se chauffer, de se déplacer, de produire du travail et bien d'autres choses. La consommation d'énergie a toujours augmenté au cours des âges. Parallèlement, le niveau de vie des hommes s'est amélioré et l'espérance de vie a augmenté. La figure 1 montre l'évolution de l'espérance de vie depuis 1750. Elle augmente constamment avec des creux correspondant aux guerres dans lesquelles la France a été impliquée. Aujourd'hui on parle de plus en plus de pollution et de son impact sur la santé alors que la pollution, en France, a beaucoup diminué dans un grand nombre de domaines par rapport aux années soixante-dix. On pense qu'on vit dans un monde de plus en plus pollué mais, paradoxalement, l'espérance de vie n'a jamais été aussi élevée.

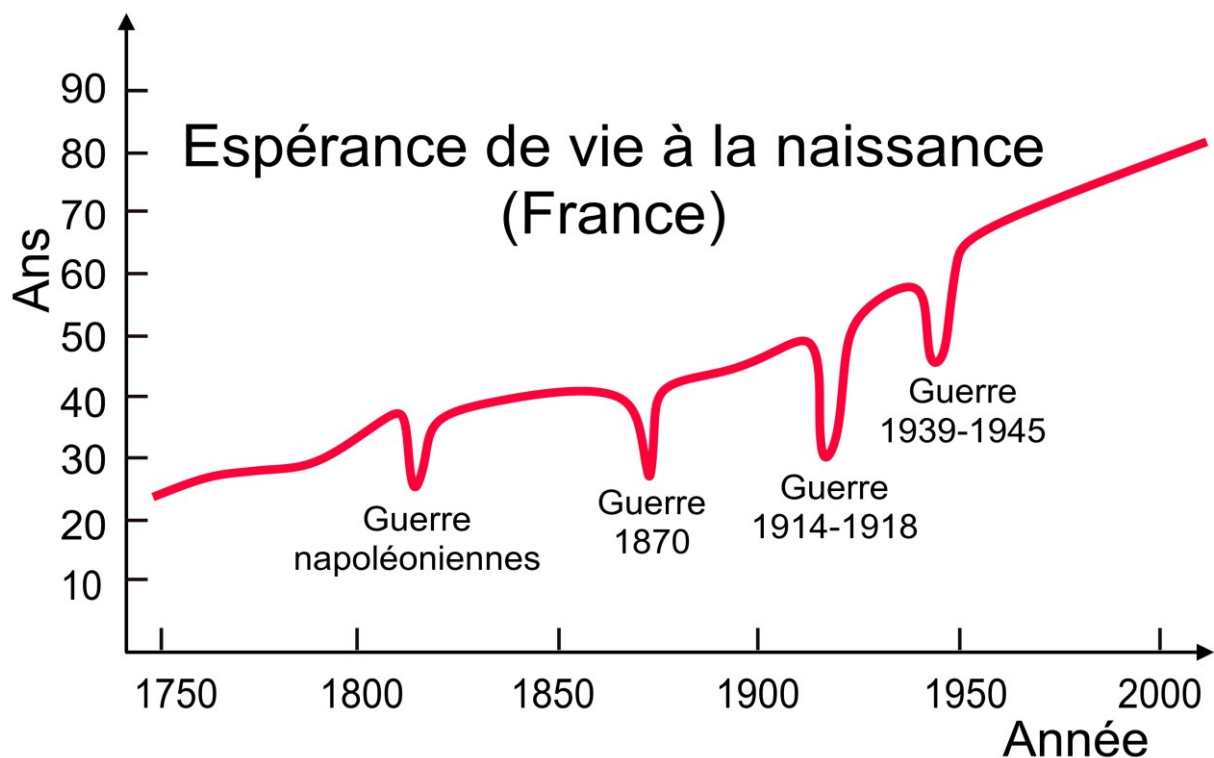


Figure 1. Évolution de l'espérance de vie à la naissance

La figure 2 montre la corrélation existant entre la consommation d'énergie, c'est-à-dire l'énergie dont on peut disposer, et l'espérance de vie. Celle-ci augmente fortement dans la région située au-dessous de 1 tep/ habitant. Elle atteint un plateau lorsque l'on consomme environ 2 à 3 tep (tonnes équivalent pétrole) par an et par habitant. Consommer plus d'énergie n'allonge pas la durée de vie. Par contre consommer bien en dessous de cette valeur conduit à des espérances de vie inférieures à celles des pays développés.

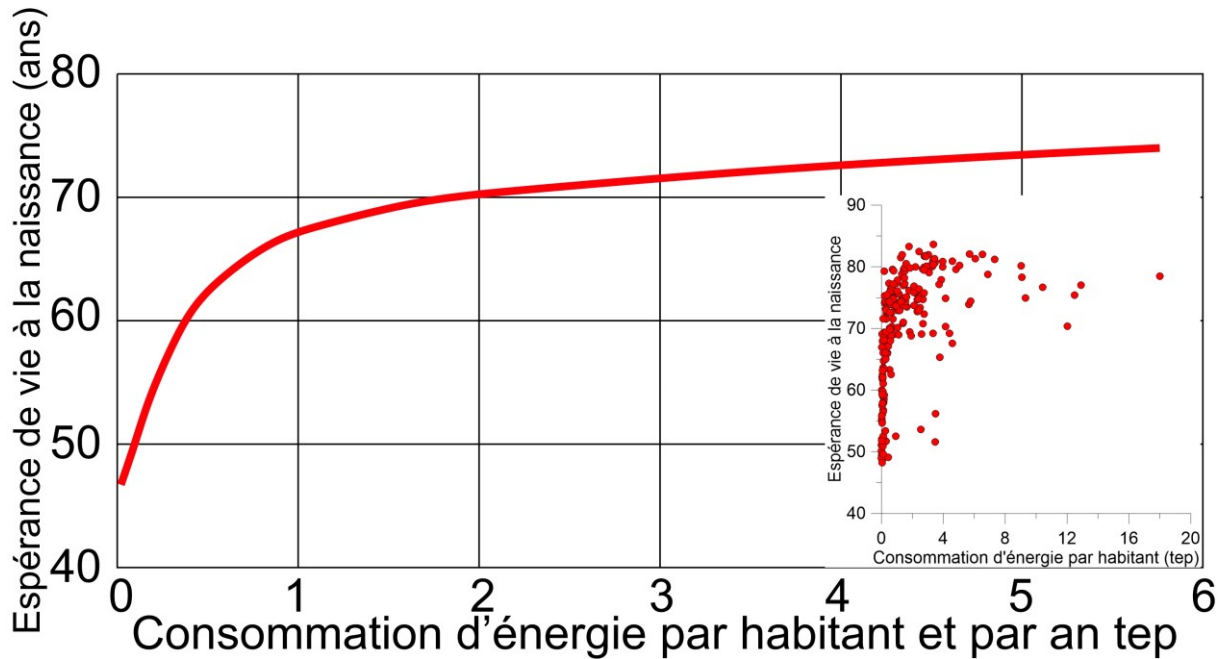


Figure 2. Corrélation entre l'espérance de vie et la consommation d'énergie. Données de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) et du PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement).

La nourriture est une forme d'énergie. On a constaté, dans le passé, que lorsqu'une population augmente sa production de nourriture, le nombre d'habitants augmente aussi.

Pour l'énergie que l'on consomme dans la vie courante et dans l'industrie, l'électricité occupe une place de plus en plus importante. Malheureusement, il y a encore aujourd'hui environ 1,2 milliard d'habitants qui n'ont pas accès à ce vecteur énergétique. Ne pas avoir accès à l'électricité est un frein majeur au développement. La plupart des pays concernés se trouvent en Afrique mais il y en a aussi en Asie et en Amérique du Sud. On peut s'en rendre compte lorsque l'on regarde les photos de la terre prises de l'espace par la NASA la nuit. On voit qu'il y a certaines régions bien éclairées alors que d'autres ne le sont que faiblement ou restent dans l'ombre.

On observe également que lorsque la consommation d'énergie par habitant augmente jusqu'à atteindre environ 2 tep par habitant et par an, la mortalité infantile diminue. Par contre, lorsque la consommation d'énergie augmente au-delà de ce seuil, la tendance est une baisse de la natalité.

On notera le rôle indirect mais important des hydrocarbures et surtout du pétrole pour l'alimentation. Ils servent à synthétiser les engrais, à transporter la nourriture, à travailler la terre, etc. Sans eux, il aurait été difficile de nourrir autant d'humains sur la terre.

En deux mots

Il est important que les gens les plus pauvres aient accès à l'énergie pour vivre et se développer. Pour cela il faut qu'elle soit le moins cher possible. Cela est contraire à l'opinion de certains Occidentaux qui souhaitent que l'énergie soit chère pour qu'on en consomme moins. Mettre des taxes pour la rendre chère dans les pays occidentaux n'est pas non plus une solution car les entreprises iront où l'énergie est peu chère avec la destruction d'emplois dans le pays qu'elles quittent.

8. L'effet de serre naturel est utile

Sans l'effet de serre naturel la terre serait invivable car la température moyenne en surface serait de -18 °C et l'eau serait sous forme de glace. Son existence permet d'augmenter la température moyenne de 33 °C et d'atteindre ainsi 15 °C . L'effet de serre est dû à la présence de certains gaz en faible quantité dans l'atmosphère terrestre. Ce n'est donc pas l'effet de serre qui est dangereux mais le fait que l'espèce humaine, avec ses activités et sa population de plus en plus nombreuse, augmente très légèrement cet effet de serre. Cette modification mineure peut avoir des répercussions majeures sur le climat.

Sans effet de serre il ferait très froid

La température moyenne dans l'univers est de -270 °C . Si notre planète était un objet dérivant dans l'espace, sans source d'énergie, elle serait à cette température. Heureusement ce n'est pas le cas. La terre s'est formée avec le Système solaire il y a environ 4,6 milliards d'années à partir de poussières d'étoiles en fin de vie. L'accrétion de ces poussières, sous l'influence de la gravitation, a créé le Soleil et les planètes, dont la Terre. De la chaleur a été dégagée au cours de ce mécanisme et la Terre a gardé une partie de celle-ci à l'intérieur.

Notre planète contient les noyaux résiduels des étoiles qui sont mortes et certains sont radioactifs. Ils libèrent de l'énergie ce qui contribue aussi à chauffer l'intérieur de la Terre. 99 % du volume intérieur de notre planète est à une température supérieure à 200 °C . La chaleur contenue sous la Terre est, à l'échelle humaine, une source d'énergie inépuisable bien qu'elle ne soit pas renouvelable. La géothermie, qui exploite cette ressource, a pour origine principale la chaleur dégagée par les noyaux radioactifs contenus dans la terre ainsi que la chaleur originelle. Cette énergie se propage très lentement car le sol n'est pas un très bon conducteur de la chaleur, heureusement pour nous sinon nous serions grillés par la chaleur interne de la Terre.

Si la chaleur interne de la Terre était la seule source d'énergie, la température en surface serait de -243 °C . Toute vie serait impossible. Mais le Soleil envoie d'énormes quantités d'énergie sous forme de rayonnement. Le flux d'énergie solaire est environ 6 000 fois supérieur à celui provenant des entrailles de la Terre. Si la Terre n'avait pas l'atmosphère qu'elle a aujourd'hui, il n'y aurait pas d'effet de serre et sa température moyenne en surface serait de -18 °C . L'eau serait sous forme de glace et la vie n'existerait pas sous la forme que nous connaissons. Heureusement, l'effet de serre naturel réchauffe la surface terrestre de 33 °C et la température moyenne à la surface est de 15 °C .

L'effet de serre

Au sommet de l'atmosphère terrestre, le flux d'énergie solaire arrivant sur la surface terrestre est de $1\,368\text{ W/m}^2$. Comme la Terre tourne sur elle-même en 24 heures, le flux solaire reçu la nuit est nul. Il y a des jours et des nuits et le flux solaire reçu varie au cours du temps. Vu du Soleil notre planète est un cercle de rayon R et de surface πR^2 . Or c'est en réalité une sphère de surface $4\pi R^2$ qui tourne sur elle-même. La puissance reçue du soleil à la surface de la Terre, perpendiculairement aux rayons lumineux du Soleil, est donc égale à $1368 \times (\pi R^2) / (4\pi R^2) = 342\text{ W/m}^2$.

Sur les 342 W/m^2 moyens arrivant du Soleil au sommet de l'atmosphère, 67 W/m^2 sont absorbés par celle-ci, 168 W/m^2 arrivent à la surface de la Terre et sont absorbés, et 107 W/m^2 sont réfléchis dans l'espace (figure 1). Le rayonnement réfléchi a deux origines : une partie du rayonnement incident est réfléchi par les nuages et les aérosols de l'atmosphère (77 W/m^2) et l'autre est réfléchi par la surface terrestre (30 W/m^2).

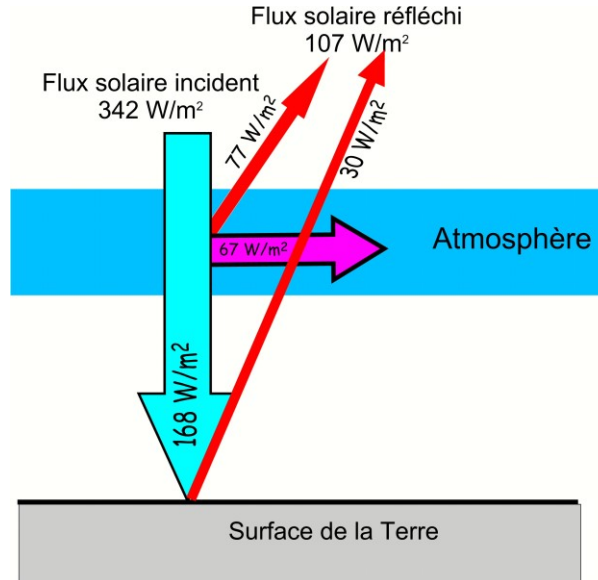


Figure 1. Flux solaire incident au sommet de l'atmosphère et sa répartition sans tenir compte de l'effet de serre. Sur le flux moyen (342 W/m^2), 107 W/m^2 sont réfléchis (67 W/m^2 par l'atmosphère et 30 W/m^2 par la surface de la Terre) et 168 W/m^2 atteignent le sol.

La Terre reçoit du Soleil 342 W/m^2 . Elle doit réémettre 342 W/m^2 car il y a équilibre thermique. Si ce n'était pas le cas, de l'énergie en provenance du Soleil s'accumulerait et la température de la surface augmenterait conduisant, entre autres, à l'ébullition des océans.

Le flux d'énergie émis par la Terre se situe dans le domaine de l'infrarouge. L'équilibre thermique entre le Soleil et la Terre implique un flux sortant, au sommet de l'atmosphère terrestre, de 235 W/m^2 (342 W/m^2 moins les 107 W/m^2 réfléchis). Cette puissance correspondrait, s'il n'y avait pas d'effet de serre, à une température moyenne en surface de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. Or, la température moyenne au niveau de la surface terrestre est de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ ce qui correspond à une puissance de 390 W/m^2 . Cette puissance n'est pas entièrement transmise par l'atmosphère qui en absorbe environ 90 % (350 W/m^2) et seule une faible part traverse celle-ci (40 W/m^2). C'est cette absorption qui va conduire à l'effet de serre.

La surface de la Terre reçoit en moyenne une puissance de 168 W/m^2 du Soleil à laquelle s'ajoute celle venant de l'atmosphère (effet de serre) qui est de 324 W/m^2 . Cela correspond à un total de 492 W/m^2 . Elle ne rayonne pas la totalité de cette puissance puisque sa température moyenne est de $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Elle émet une puissance de 390 W/m^2 . La différence qui est de 102 W/m^2 est transférée à l'atmosphère par d'autres mécanismes : l'évaporation (78 W/m^2) et la conduction (chaleur sensible, c'est-à-dire celle qui sert à chauffer de l'eau : 24 W/m^2).

La puissance moyenne absorbée par l'atmosphère est la somme de celle en provenance du rayonnement solaire direct (67 W/m^2), de celle venant de la surface terrestre (350 W/m^2) et de celle venant des autres mécanismes (102 W/m^2). Cela représente un total de 519 W/m^2 qui se répartissent en 195 W/m^2 vers l'espace et 324 W/m^2 vers la Terre et absorbés par la surface.

L'atmosphère, qui absorbe très bien le rayonnement infrarouge permet donc d'augmenter la température moyenne de la surface de la Terre en s'interposant entre le rayonnement solaire et celle-ci. L'effet de serre permet de faire une redistribution de l'énergie solaire au profit de la surface terrestre. Ceci est résumé dans la figure 2.

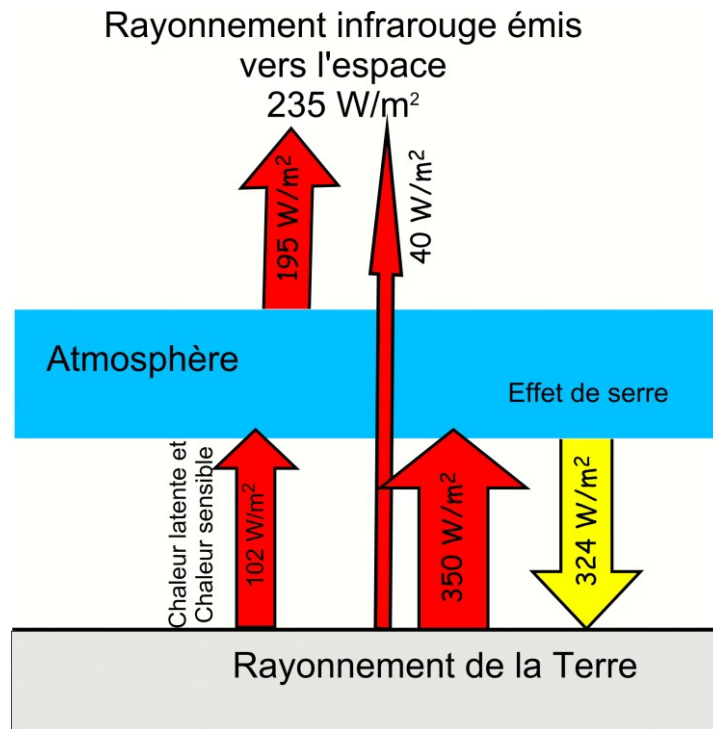


Figure 2. Flux émis par la surface terrestre. Une partie est capturée par l'atmosphère qui réémet dans toutes les directions, notamment vers la Terre : c'est l'effet de serre. Ce dernier augmente la température moyenne à la surface de la Terre.

Les gaz à effet de serre

La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre le plus important. Elle contribue à hauteur d'environ 55 % à l'effet de serre naturel. Viennent ensuite le gaz carbonique pour 39 %, le méthane et le protoxyde d'azote et l'ozone pour chacun 2 %.

La vapeur d'eau est un gaz qui a un impact important sur l'effet de serre naturel. Elle provient de l'évaporation naturelle des océans, des rivières, de l'évapotranspiration des plantes... La vapeur d'eau ne représente en moyenne que de l'ordre de 0,4 % du volume de l'atmosphère. Cette concentration est plus grande dans les zones maritimes équatoriales qu'en Sibérie, par exemple. Si l'on condensait par la pensée toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, cela représenterait un volume d'eau, sur l'ensemble de la surface terrestre, d'une épaisseur de 2,5 cm. Il tombe en moyenne 1 m de pluie par an ce qui signifie qu'une molécule d'eau ne reste pas très longtemps dans l'atmosphère avant de retomber sur la Terre. Comme 71 % de la surface terrestre est couverte par les océans, l'évaporation naturelle domine largement l'alimentation de l'atmosphère en vapeur d'eau. On estime la contribution humaine à la vapeur d'eau atmosphérique à moins de 0,003 %. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on parle de changement climatique, on ne considère pas la vapeur

d'eau comme un gaz à effet de serre. En effet, la contribution des activités humaines à sa concentration est tout à fait négligeable.

Le gaz carbonique est le deuxième gaz à effet de serre par ordre d'importance. Une partie est d'origine naturelle, comme c'est le cas lors des émissions volcaniques. Une autre partie vient des activités humaines. C'est cette partie qui est préoccupante. Contrairement aux molécules d'eau, les molécules de CO₂ restent très longtemps dans l'atmosphère (de l'ordre du siècle).

Une partie du méthane présent dans l'atmosphère a une origine naturelle. Il se dégage dans les zones humides comme les marécages. Il est produit lors de la décomposition anaérobie, c'est-à-dire en l'absence d'air, de la cellulose ou d'autres matières organiques.

Le protoxyde d'azote a aussi une part naturelle : il est émis par les micro-organismes des sols recouverts de végétation ou dans les zones aquatiques.

Il est intéressant de comparer la situation de la Terre avec celles de deux autres planètes : Vénus, située plus près du soleil et Mars situé plus loin. L'atmosphère de Vénus est constituée à 96 % de gaz carbonique et celle de Mars de 95 %. Toutefois la pression atmosphérique sur Vénus est 92 fois la pression atmosphérique terrestre qui est d'environ 1 bar alors qu'elle n'est que de 0,006 bar sur Mars. L'effet de serre sur Vénus est beaucoup plus important que celui sur Terre ou Mars. Cela correspond à un surcroît de température de 505 °C sur Vénus et seulement de 6 °C sur Mars (33 °C pour la Terre). La température moyenne à la surface de Vénus est de 460 °C mais elle est plus faible à la surface de Mercure (179 °C) pourtant plus près du Soleil mais dont l'atmosphère est négligeable.

En deux mots

C'est grâce à l'effet de serre naturel que nous existons sur la terre. Il a beaucoup diminué depuis que la Terre existe. Une grande partie du CO₂ qui était présent dans l'atmosphère bien avant que les êtres vivants existent s'est transformée en calcaire que l'on trouve dans le sol. La vapeur d'eau est le gaz qui génère la plus grande partie de l'effet de serre naturel. Ce n'est donc pas contre l'effet de serre qu'il faut lutter mais contre son accroissement dû aux activités humaines.

9. L'effet de serre anthropique

Les activités humaines, notamment l'utilisation des combustibles fossiles, émettent des gaz à effet de serre. La concentration de ceux-ci augmente régulièrement dans l'atmosphère et ceci a un impact sur l'effet de serre, donc sur le climat.

Le secteur énergétique

Le secteur de l'énergie est responsable de plus de 80 % des émissions anthropiques, c'est-à-dire dues aux activités humaines, de gaz à effet de serre (figure 1 à gauche). Parmi ces gaz, le gaz carbonique (CO₂) occupe une place prépondérante (figure 1 à droite).

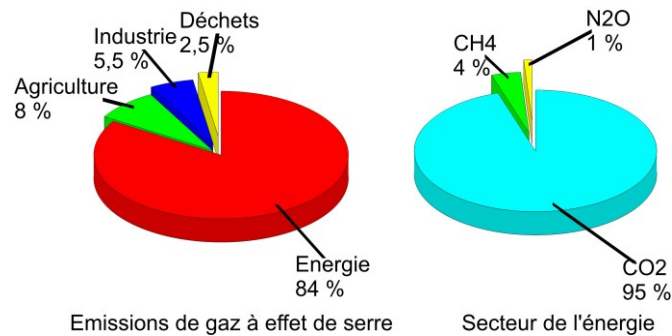


Figure 1. Contribution des différents secteurs aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre en 2003 (gauche). À droite, contributions relatives des différents gaz à effet de serre dans le secteur de l'énergie. Données de « CO₂ emissions from fuel combustion », 2006, Agence Internationale de l'Énergie.

La concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui était de 280 ppm avant l'ère préindustrielle a fortement augmenté et dépasse maintenant 400 ppm. La figure 2 montre l'accroissement rapide des émissions de CO₂ entre 1750 et 2011 due à l'utilisation des combustibles fossiles. On est passé de pratiquement zéro en 1750 à 34,6 Gt de CO₂ en 2011.

Énergie et espérance de vie

Les trois quarts des émissions de gaz à effet de serre sont le fait de 25 % de la population mondiale. Il y a de profondes inégalités dans l'accès à l'énergie car celle-ci a un prix. Beaucoup d'habitants de la Terre n'ont pas les moyens de s'offrir cette commodité comme le montre le tableau 1. L'espérance de vie est aussi beaucoup plus faible dans les pays pauvres car si les habitants n'ont accès qu'à peu d'énergie ils manquent aussi de nourriture et d'autres biens essentiels à la santé.

Pourcentage de la population	Pourcentage de l'énergie primaire consommée	Espérance de vie
20 %	80 %	> 75 ans
60 %	19 %	> 50 ans
20 %	1 %	< 40 ans

Tableau 3. Ordre de grandeurs concernant la consommation d'énergie primaire et l'espérance de vie.

Les pays riches parlent beaucoup d'énergies renouvelables mais leurs besoins sont en majorité satisfaits par les combustibles fossiles. Les habitants des pays pauvres utilisent tous les jours des énergies renouvelables mais rêvent d'avoir un accès plus important aux combustibles fossiles.

En délocalisant une partie de leurs activités industrielle dans les pays émergents, comme la Chine par exemple, les pays riches ont contenu leurs émissions de CO₂ et les ont transférées, ainsi que la consommation d'énergie associée, aux pays émergents.

Les émissions de CO₂

Les émissions d'un pays dépendent des émissions par habitant mais aussi de sa population. C'est le produit des émissions par la population qui est le paramètre important. Ainsi les habitants du Qatar sont de très gros émetteurs de CO₂ (≈ 44 tonnes de CO₂ par habitant et par an) mais la population est peu nombreuse : leur impact au niveau mondial est faible. La Chine émet peu par habitant ($\approx 6,6$ tonnes de CO₂ par habitant et par an) mais la population est au contraire très importante. C'est pour cela que les émissions sont comparables à celles des États-Unis ($\approx 16,6$ tonnes de CO₂ par habitant et par an) où la population est plus faible mais où chaque Américain émet beaucoup plus. À titre de comparaison, les émissions en France sont de 5,3 tonnes de CO₂ par habitant et par an et de 8,8 pour l'Allemagne.

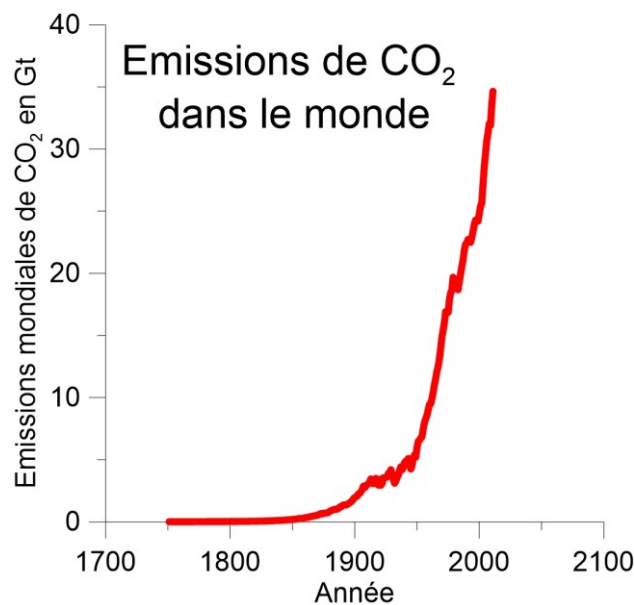


Figure 2. Évolution des émissions de CO₂ issues des combustibles fossiles entre 1750 et 2011. Cela inclut les émissions des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) ainsi que celles résultant des torchères de gaz naturel et de la production de ciment. Données de « Dioxide information center », Oak Ridge.

Le CO₂ peut avoir en effet 2 origines. Il peut être émis lors de la production d'électricité : ce sont les émissions directes. Mais du CO₂ est aussi émis lors de la construction de la centrale de production, lors de la fabrication de produits manufacturés nécessaires à l'exploitation, lors du transport du combustible, etc. : ce sont les émissions indirectes.

Une évaluation du CO₂ émis dans les différentes filières de production d'électricité a été faite par l'Agence internationale de l'énergie. Les résultats sont indiqués dans la figure 5.

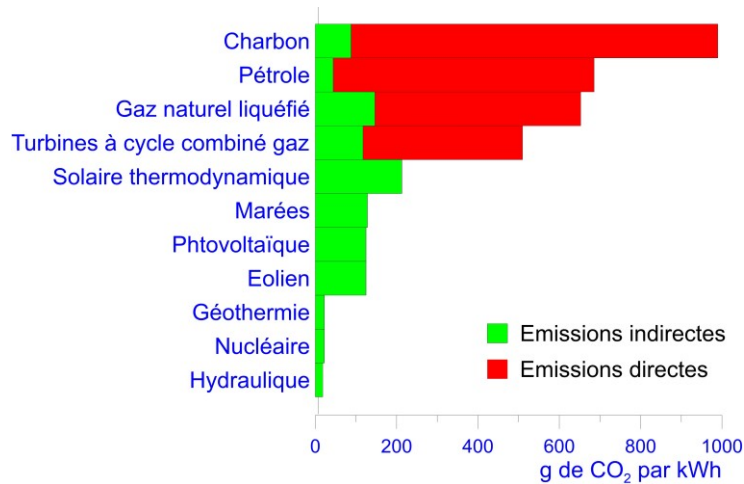


Figure 3. Ordres de grandeur des émissions directes et indirectes de CO₂ par kWh d'électricité produit selon les différentes technologies utilisées. Données de www.iea.org.

Ces chiffres doivent être pris comme des ordres de grandeur car, pour une même source d'énergie primaire, ils dépendent des technologies utilisées pour produire de l'électricité. Ainsi le rendement n'est pas le même quand on brûle du gaz dans une turbine simple ou à cycle combiné. De même, prenons le cas de l'énergie nucléaire. Si l'uranium est enrichi en utilisant comme source d'énergie de l'électricité produite avec des centrales nucléaires, comme cela a été le cas en France à l'usine George Besse, ou de l'électricité produite majoritairement avec du charbon, comme c'est le cas aux États-Unis, on ne trouvera pas la même valeur pour les émissions de CO₂ par kWh d'électricité produit. À ce sujet, l'enrichissement par ultracentrifugation est beaucoup plus économique en énergie que l'enrichissement par diffusion gazeuse.

On peut être étonné de la valeur relativement importante des émissions de CO₂ issues du photovoltaïque, Cela vient du fait que la fabrication des cellules, avec la technologie actuelle, est fortement consommatrice d'énergie. En fonctionnement, bien sûr, aucun gaz à effet de serre n'est émis.

En deux mots

Relâcher des gaz à effet de serre comme le CO₂ ou le méthane a pour effet d'accroître l'effet de serre naturel : c'est un phénomène physique. Les conséquences de cet accroissement de l'effet de serre sont évaluées avec des modèles théoriques complexes dans lesquels tous les phénomènes physiques ne sont pas facilement pris en compte et certains sont même ignorés, comme les nuages par exemple. Ces prédictions sont utiles pour essayer d'anticiper ce qui peut arriver au climat mais elles doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non comme des certitudes.

10. Ne pas confondre énergie et émissions de CO₂

On pense souvent que réduire les émissions de CO₂ pour lutter contre le changement climatique équivaut à réduire notre consommation d'énergie. Il n'y a pas toujours équivalence et parfois réduire sa consommation d'énergie ne réduit pas les émissions de CO₂. C'est le cas par exemple lorsque l'on utilise des énergies renouvelables ou de l'électricité produite par le nucléaire. Il est par contre indispensable de réduire la consommation de combustibles fossiles qui, eux, émettent du CO₂ en brûlant.

Diversité de production électrique

Chaque pays a son mix énergétique pour produire de l'électricité. Celui-ci dépend de ses ressources et des technologies qu'il a développées ou qu'il utilise. Au niveau mondial, 68 % de l'électricité est produite à partir des combustibles fossiles. Le charbon représentant environ 40 % et le gaz naturel 22 %. Or le charbon est un moyen particulièrement polluant pour l'environnement et un gros émetteur de CO₂ en brûlant.

La figure 1 illustre, pour l'année 2004, la diversité des moyens de production de l'électricité pour quatre pays différents : les États-Unis, le Danemark, l'Allemagne et la France. On constate que les États-Unis, le Danemark et l'Allemagne produisent leur électricité en utilisant majoritairement des combustibles fossiles, donc en émettant des quantités considérables de CO₂. La France, au contraire, grâce à l'hydraulique et au nucléaire, produit l'essentiel de son électricité sans émission de CO₂.

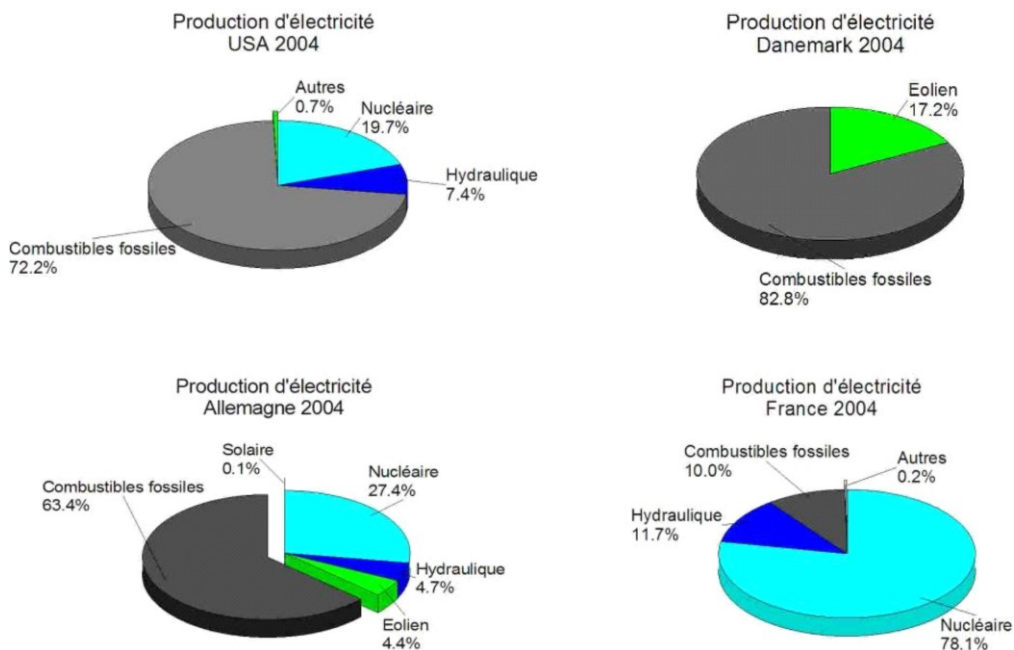


Figure 1. Production d'électricité en 2004 pour différents pays selon la source d'énergie. Ceci illustre que selon le pays les modes de production peuvent être très différents.

Consommer en émettant peu de CO₂

Pour illustrer le fait que l'énergie et le CO₂ sont deux variables différentes, considérons deux pays : la Suède et le Danemark.

En Suède, la consommation d'électricité par habitant et par an est, en moyenne, de 15 MWh. Cette production d'électricité conduit à l'émission de 5,3 tonnes de CO₂ par habitant et par an en moyenne.

Le Danemark consomme moins d'électricité par habitant et par an : en moyenne 6,9 MWh. Si l'on ne considère que ce paramètre, on pourrait conclure que le Danemark est un meilleur élève que la Suède en matière de pollution. Or, rapporté à chaque danois, les émissions de CO₂ sont en moyenne de 10,1 tonnes par an.

En comparant la consommation d'électricité dans ces deux pays, on constate qu'un Suédois émet deux fois moins de CO₂ qu'un danois tout en consommant deux fois plus d'électricité. Ceci provient de ce que la Suède produit l'essentiel de son électricité avec de l'hydraulique et du nucléaire qui n'émettent pas de CO₂ en fonctionnement, alors qu'une grande partie de l'électricité produite au Danemark est issue de centrales à charbon fortement émettrices de CO₂. De plus, si la partie de l'énergie éolienne exportée du Danemark vers la Suède ou la Norvège, quand il n'y a pas de demande, n'était pas réimportée aux heures de pointe, il faudrait faire fonctionner des centrales à flamme et donc émettre encore plus de CO₂.

En deux mots

Actuellement, beaucoup de personnes considèrent que consommer de l'énergie c'est émettre des gaz à effet de serre. Ceci n'est vrai que pour les combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). Les énergies renouvelables et le nucléaire n'émettent pas de CO₂ en fonctionnement. Cependant, le peu de flexibilité des réacteurs nucléaires nécessite un minimum d'électricité en provenance de centrales brûlant des combustibles fossiles (de l'ordre de 10 %) pour satisfaire les demandes de pointe lorsque le parc est très nucléarisé comme c'est le cas en France. D'un autre côté, l'éolien et le photovoltaïque sont des énergies intermittentes. Pour un mix électrique presque totalement éolien et photovoltaïque, il faut pouvoir gommer cette intermittence pour satisfaire à chaque instant les besoins du consommateur. Cela peut se faire principalement en mettant en service des centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles et de gros moyens de stockage. L'utilisation d'un réseau intelligent (smart grid) n'intervenant qu'à la marge surtout pour « effacer » des consommateurs lors d'une demande de pointe. Le besoin en centrale thermique utilisant des combustibles fossiles sera variable selon le pays et les moyens de stockage existants. On peut estimer grossièrement cela à environ 20 %. Un remplacement, en France, de l'énergie nucléaire par des énergies intermittentes comme l'éolien et le photovoltaïque conduirait au paradoxe que notre pays émettrait plus de CO₂ pour produire son électricité qu'avant et ceci à un coût supérieur. On pourrait toutefois limiter cette augmentation par des moyens de stockage de l'électricité. Au niveau mondial, un remplacement total du parc nucléaire pourrait augmenter de 200 TWh/an l'électricité d'origine fossile et accroître les émissions de CO₂ de quelques pourcents.

11. Le défi énergétique français

L'énergie est encore aujourd'hui abondante et bon marché. Avec une dizaine de centimes d'euros on peut, en France, acheter 1 kWh d'électricité. Cette quantité d'énergie correspond à l'énergie physique que fournissent 2 bûcherons pendant une journée. Même en ne faisant que nourrir ces derniers, sans les rétribuer, le coût serait beaucoup plus élevé. Il suffit de comparer le travail effectué par un bûcheron utilisant une tronçonneuse et un autre n'utilisant qu'une hache pour voir que le premier est beaucoup plus efficace que le second.

Les combustibles fossiles sont un héritage de la Nature. Ils se sont formés il y a des centaines de millions d'années à partir de la biomasse en utilisant l'énergie solaire, le gaz carbonique présent dans l'atmosphère et l'eau dans le sol. Le mécanisme de formation s'est étendu sur des millions d'années et nous les consommons actuellement sur une échelle de temps beaucoup plus courte. Ils devraient être, pour une bonne part, épuisés ou rares en quelques siècles au plus.

Les combustibles fossiles ont permis un développement rapide de notre civilisation. Ils représentent aujourd'hui environ 80 % de la consommation en énergie primaire (c'est-à-dire disponible sans transformation) de la planète et on ne pourra pas s'en passer du jour en lendemain sauf en mettant gravement en cause la civilisation moderne et sa stabilité. Quoiqu'on fasse, les combustibles fossiles s'épuiseront peu à peu, le pétrole bon marché et le gaz naturel avant la fin du siècle, le charbon un peu plus tard. Une crise, c'est-à-dire une rupture dans l'évolution de la civilisation, est donc inévitable. Quand on dilapide un héritage il arrive un jour où il n'y a plus rien. Si on est très économe, l'échéance peut s'éloigner mais elle ne disparaîtra pas.

Une famille française consomme en moyenne 3 500 kWh d'électricité dans l'année, hors chauffage. Le coût de production est de l'ordre de 100 € et le prix payé par cette famille au producteur d'électricité de l'ordre de 450 €. Si l'on voulait produire la même quantité d'électricité avec des personnes pédalant sur un vélo relié à une dynamo, il faudrait environ 7 000 jours de travail et un moyen de stockage si la production ne se fait pas 24 heures sur 24. Même en les payant au tarif du salaire minimum, cela représenterait, hors charges sociales, plus de 500 000 €/an. Cette évaluation très simple explique pourquoi notre niveau de vie et notre confort sont en moyenne bien supérieurs à ceux de nos ancêtres. Cela vient de ce que l'on a accès à de l'énergie en abondance et à faible coût.

Contraintes et défis

Le monde est aujourd'hui confronté à deux contraintes :

1. La première concerne les émissions de gaz à effet de serre et notamment de CO₂ (gaz carbonique). Les activités humaines émettent environ deux fois plus de CO₂ que ce que la nature peut absorber. La concentration de CO₂ augmente chaque année dans l'atmosphère ce qui augmente l'effet de serre avec des conséquences sur le climat. L'échelle de temps pour répondre à ce problème est courte.
2. La deuxième contrainte vient de ce que les combustibles fossiles, sur lesquels repose en grande partie la civilisation actuelle en matière d'énergie, sont en quantité finie sur la terre. Même si l'on commence à exploiter de manière importante des res-

sources non conventionnelles comme le gaz ou le pétrole de schiste, les réserves en combustibles fossiles s'épuisent peu à peu. À l'échelle d'un ou quelques siècles au plus le pétrole sera rare et cher et il faut dès à présent réduire notre consommation en combustibles fossiles et substituer ceux-ci par d'autres sources d'énergie. Comparée à la contrainte de moins émettre de CO₂, l'échelle de temps pour se passer complètement des combustibles fossiles est longue.

Les deux défis répondant à ces contraintes (figure 1) sont de :

1. Réduire les émissions de gaz à effet de serre et notamment de CO₂ dans les utilisations énergétiques.
2. Réduire peu à peu notre dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon et combustibles fossiles non conventionnels).

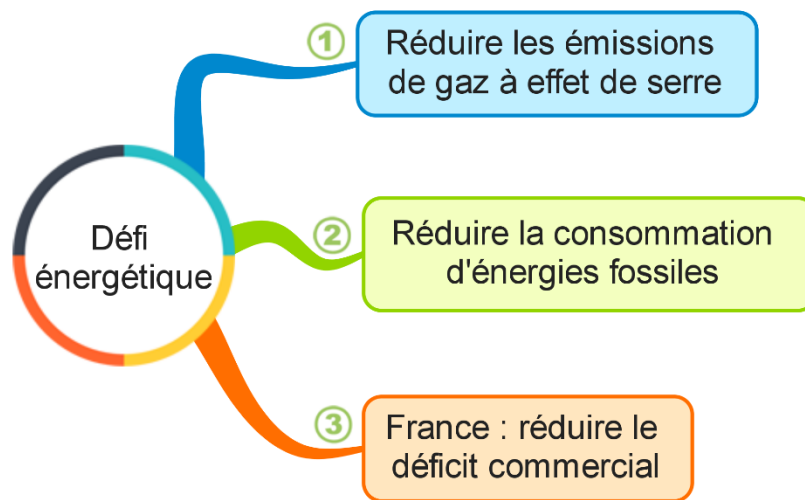


Figure 1. Les trois défis auxquels est confrontée la France dans le domaine de l'énergie.

La troisième contrainte de la France

L'autre problème auquel est confrontée la France est un déficit commercial dont une grande partie provient de l'importation de combustibles fossiles. Ainsi, en 2011, le déficit commercial se montait à 69,6 milliards d'euros et l'importation de combustibles fossiles représentait 61,4 milliards d'euros. Presque 90 % du déficit est donc lié à l'énergie. Lorsque le prix du baril de pétrole diminue, comme ce qui se passe depuis quelque temps, le déficit diminue mais il s'accroîtra à nouveau avec la hausse du pétrole qui se produira un jour ou l'autre.

Le troisième défi auquel est confrontée la France est donc de réduire le plus rapidement possible ses importations de combustibles fossiles. S'il n'y avait pas l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité, il faudrait entre 10 et 20 milliards d'euros pour importer du gaz naturel pour produire la même quantité d'électricité. La balance commerciale serait beaucoup plus détériorée et les émissions de CO₂ fortement augmentées. Notons aussi que le remplacement de réacteurs nucléaires par des éoliennes va aussi dans le sens d'augmenter les émissions de CO₂ puisqu'il faut des centrales thermiques complémentaires pour produire de l'électricité en l'absence de vent suffisant. Cette augmentation, difficile à évaluer car elle

dépend des moyens de stockage disponibles, peut-être de l'ordre de 10 % de l'énergie produite.

En deux mots

Pour la France, une priorité est de réduire le déficit commercial dont la majeure partie provient de l'importation de combustibles fossiles. Réduire l'utilisation des combustibles fossiles est donc nécessaire. L'hydraulique et le nucléaire permettent déjà de produire environ 90 % de l'électricité sans émission de gaz à effet de serre. Fermer des centrales nucléaires qui fonctionnent pour les remplacer par des éoliennes et des panneaux photovoltaïques augmente le besoin de centrales à gaz ou à charbon pour fournir de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de vent ou de soleil en quantité suffisante. D'autre part, il faut utiliser l'électricité décarbonée pour des usages consommant actuellement du pétrole comme les transports ou le chauffage de l'habitat. La consommation d'électricité va donc très probablement augmenter.

12. L'utopie du facteur 4 de réduction des émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ anthropiques, c'est-à-dire d'origine humaine, ont été de 32,3 milliards de tonnes en 2014. Cela représente en moyenne une émission de 4,5 tonnes par habitant avec bien sûr de grandes disparités². Le CO₂ issu du domaine énergétique (combustion des combustibles fossiles) représente une large part du CO₂ anthropique total.

Actuellement les émissions de CO₂ d'origine humaine sont deux fois supérieures à ce que la nature peut absorber. Chaque année la concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente ce qui a pour conséquence d'augmenter l'effet de serre. Avant l'ère préindustrielle, la concentration de CO₂ dans l'air était de 280 ppm (partie par million) alors qu'elle a atteint 400 ppm en 2014 et ne cesse d'augmenter.

Pourquoi un facteur 4

Au début du siècle, le gouvernement français s'est engagé à diviser par 4 ses émissions de gaz carbonique à l'horizon 2050. Pourquoi un facteur 4 et non un facteur 2 ou 10, par exemple ? Ce choix a été dicté en évaluant ce que la nature peut absorber comme CO₂. En effet, au niveau de la planète, les activités humaines émettent chaque année environ 2 fois plus de CO₂ que ce que la nature peut absorber dans les océans et la végétation terrestre. Si l'on souhaite que les émissions humaines soient en équilibre avec la nature, il faudrait, au niveau mondial, diviser par 2 les émissions de CO₂. La France a la chance de ne pas trop émettre de CO₂ car 90 % de son électricité est produite par l'hydraulique et le nucléaire, c'est-à-dire sans émission de CO₂. Les émissions moyennes de CO₂ sont d'environ 2 tonnes de carbone³ par an par Français. Ceci correspond environ à 2 fois plus de CO₂ que la moyenne mondiale. Il faudrait donc qu'elle divise par 4 ses émissions, d'où le fameux facteur 4.

Comme ordre de grandeur, chaque habitant de la terre ne devrait pas émettre plus de 1,8 tonne de CO₂ par an, ce qui correspond à environ 500 kg de carbone. Une émission de 500 kg de carbone est une faible quantité : cela correspond à environ une dizaine de milliers de km parcourus dans l'année par une voiture moyenne.

Émissions de CO₂ des pays

Si l'on regarde les émissions moyennes 2004 par habitant de quelques pays (figure 1), on voit que les pays développés émettent bien plus que 500 kg de carbone par an et par personne. Un Français en émet en moyenne 4 fois plus et un Américain environ 11 fois plus. Même la Chine a dépassé cette limite. Les habitants des pays pétroliers, qui ont accès au pétrole pratiquement gratuitement, émettent beaucoup plus que les autres ; c'est par

²Un habitant du Qatar émet 2,5 fois plus de CO₂ qu'un habitant des États-Unis et 207 fois plus qu'un habitant du Bangladesh.

³ Il y a un rapport de masse de 3,667, entre le CO₂, (dont la masse moléculaire est de 44 g) et le carbone C dont la masse moléculaire est de 12 g.

exemple le cas du Koweït. Seuls des pays pauvres comme le Bangladesh ou le Vietnam sont au-dessous de ce seuil et pourraient augmenter leurs émissions. En Inde, une grande partie de la population est dans un état de grande pauvreté ce qui explique des émissions moyennes au-dessous des 500 kg de carbone. Cette courbe montre que la plupart des pays devraient considérablement réduire leurs émissions, c'est-à-dire leur consommation d'énergie fossile, et donc leur modifier leur mode de vie.

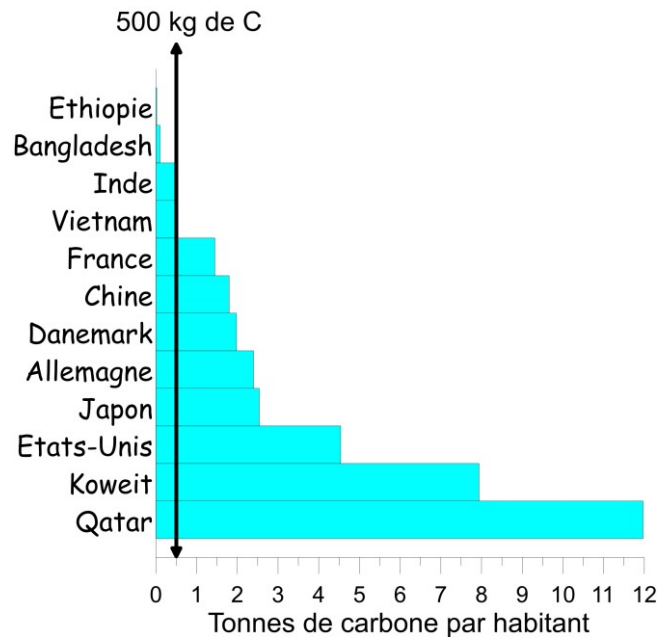


Figure 1. Émissions 2004 de CO₂ par habitant dues à l'usage de l'énergie pour quelques pays. La valeur est donnée en tonnes de carbone. Pour calculer les émissions en tonnes de CO₂ il faut multiplier ces chiffres par 3,7. (Données AIE, <http://cdiac.ornl.gov>).

500 kg de C ou 1,8 tonne de CO₂ sont de faibles émissions. Seuls des pays pauvres comme le Bangladesh (240 kg de CO₂/an/habitant en 2004) ou l'Éthiopie (70 kg de CO₂/an/habitant en 2004) satisfont à ce critère. Les pays développés émettent beaucoup plus comme par exemple les habitants des USA (19,7 tonnes de CO₂/an/habitant en 2004) ou les Allemands (10,25 tonnes de CO₂/an/habitant en 2004).

Si l'on avait l'autorisation de n'émettre que 1,8 tonne de CO₂/an /habitant, on pourrait soit faire une dizaine de milliers de kilomètres avec une voiture moyenne, soit pouvoir construire 4 m² d'une construction traditionnelle. Une famille de 4 personnes devrait ainsi mettre tout son crédit carbone pendant 7 ans pour construire une maison de 120 m².

Évolution des émissions de CO₂ en France

Il est toujours intéressant de regarder le passé pour essayer d'imaginer le futur. La figure 2 montre l'évolution des émissions de CO₂ entre 1802 et 2013 pour la France. On observe, au cours de cette période, une croissance régulière avec trois creux. Les deux premiers correspondent à des périodes où les émissions de CO₂ ont fortement baissé et le troisième se traduit par une décroissance suivie d'un plateau. Les deux premiers creux correspondent aux deux guerres mondiales. Lors d'une guerre, l'activité économique est fortement ralentie et les émissions sont moins importantes. La dernière décroissance, suivie d'un plateau, corres-

pond au démarrage des centrales nucléaires dans les années 1980. Le nucléaire n'émettant pas de CO₂ en fonctionnement, on a fortement fait décroître les émissions.

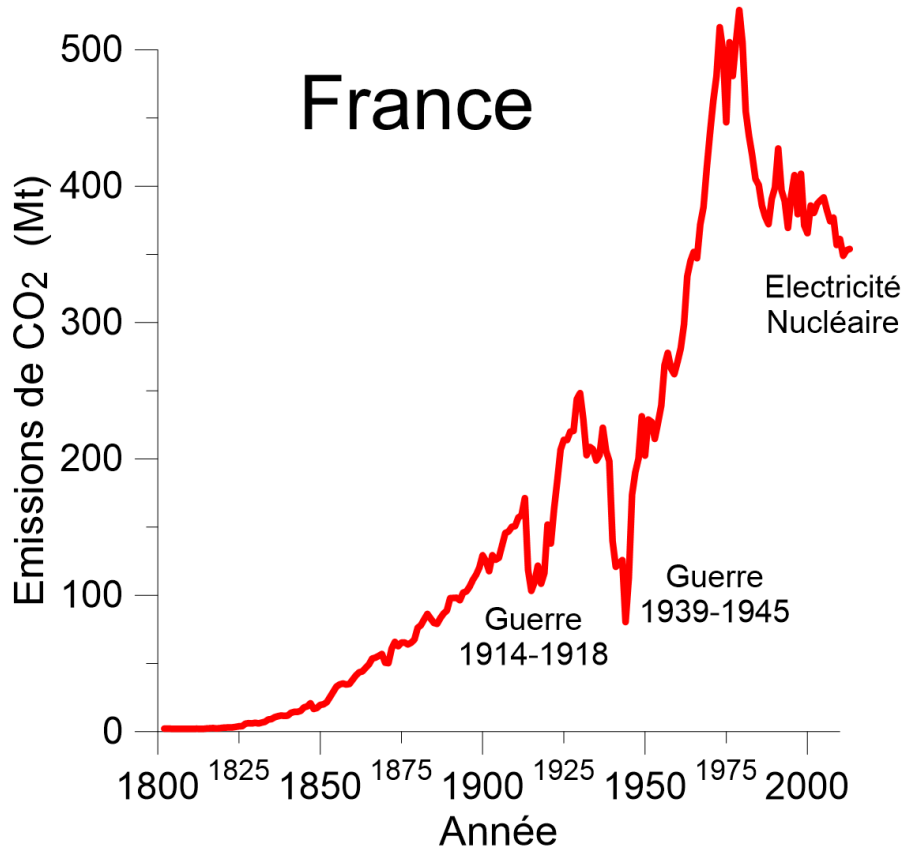


Figure 2. Évolution des émissions de gaz carbonique depuis 1800. Données de « dioxide information analysis centre », Oak Ridge, TN, USA, <http://cdiac.ornl.gov/>.

La figure 2 montre aussi que **la France a, dans son histoire, divisé par quatre ses émissions de gaz carbonique lors du passage de l'entre-deux-guerres à la Seconde Guerre mondiale** qui a particulièrement touché la population civile. Cela s'est traduit par un changement important des conditions de vie puisque les Français ne mangeaient pas tous les jours à leur faim, avaient des tickets de rationnement et les déplacements sur de longues distances étaient rares.

Cette simple constatation historique devrait nous faire réfléchir quant à la possibilité de réduire facilement d'un facteur 4 nos émissions de CO₂. Nous vivons en effet à une époque où la consommation d'énergie est sans commune mesure avec celle des personnes vivant avant la Seconde Guerre mondiale.

Avant les deux guerres mondiales, le pouvoir d'achat moyen d'un français a culminé, dans la première moitié du 20^{ème} siècle, en 1913. Celui-ci n'a été rattrapé qu'en 1968 et il a fortement augmenté dans les trente années qui ont suivi avant de diminuer lors de la dernière décennie. De nouveaux besoins, consommateurs d'énergie et émetteurs de gaz à effet de serre, sont apparus et l'utilisation des transports a explosé. En un demi-siècle, le réseau autoroutier français a atteint environ 10 000 km, le réseau de train à grande vitesse (TGV) s'est mis en place avec plus de 1 500 km de voies et des aéroports internationaux et nationaux sont entrés en service. Arrêter tout cela mettrait à mal l'économie française.

Rappelons aussi, comme le montre la figure 3, que la population française a doublé en deux siècles.

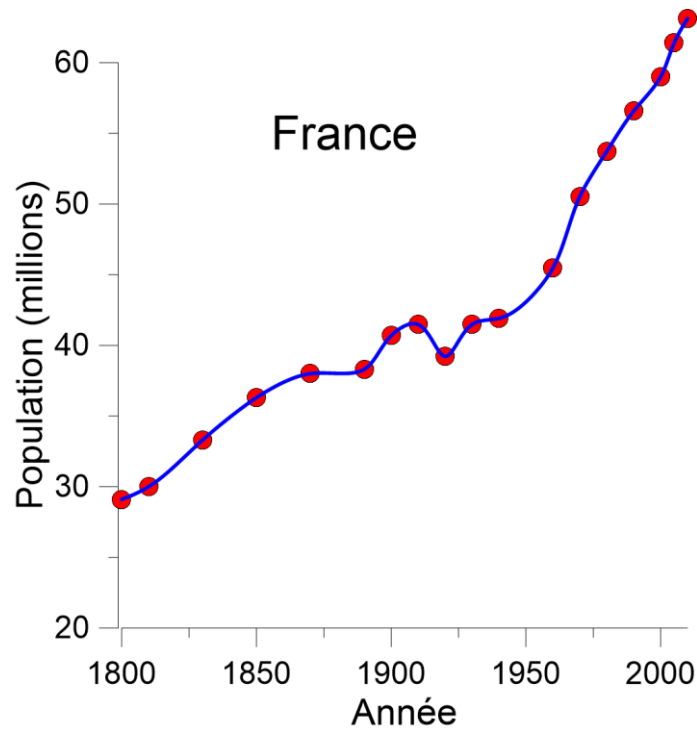


Figure 3. Évolution de la population française depuis 1 800.

Objectif : facteur 2

Si diminuer les émissions d'un facteur 4 semble un objectif extrêmement difficile à atteindre, un facteur 2 reste dans la limite du possible.

Faisons maintenant quelques évaluations en utilisant des valeurs arrondies pour estimer l'objectif que l'on pourrait atteindre. L'énergie finale consommée en France se répartit très grossièrement sous les formes suivantes : 500 TWh (terawattheures) sous forme d'électricité, 500 TWh pour les transports et presque 1 000 TWh pour le reste dont la majeure partie consiste en de la chaleur. Sur ces 1 000 TWh, les 2/3 sont consommés dans le résidentiel/tertiaire et 1/3 dans l'industrie. On peut espérer obtenir les réductions suivantes :

- Comme 90 % de l'électricité est produite sans émission de gaz à effet de serre (hydraulique et nucléaire), on peut au mieux gagner 10 % et atteindre 100 % en étendant le parc de production avec des énergies renouvelables et du nucléaire. Les moyens supplémentaires d'électricité pourraient servir, aux heures creuses, à recharger les batteries de véhicules hybrides rechargeables ou électriques.
- Des innovations sont nécessaires au niveau des transports routiers : véhicules hybrides rechargeables ou électriques (contribution pour 30 % de l'électricité à l'énergie totale) et biocarburants de deuxième génération (contribution pour 20 %). Même si des développements sont en cours, nous sommes encore loin d'un stade industriel à grande échelle dans ces deux domaines.
- Au niveau de la chaleur, des progrès importants sont possibles, en utilisant massivement des pompes à chaleur, en isolant les bâtiments, en maîtrisant mieux l'énergie,

en choisissant pour l'industrie de nouveaux procédés, etc. Dans ce domaine un facteur 4 est déjà possible avec les technologies existantes.

Au total, cela ne fait qu'un facteur de l'ordre de 3 sur l'énergie finale et proche de 2 pour l'énergie primaire.

En effet, le raisonnement ci-dessus ne s'adresse qu'à l'énergie finale. Or entre l'énergie primaire et l'énergie finale il y a environ 40 % de pertes. On peut essayer de réduire celles-ci mais certaines sont inhérentes aux lois physiques comme le principe de Carnot, par exemple.

On peut améliorer les performances des centrales produisant de l'électricité. Ainsi, avec des réacteurs nucléaires, on peut passer d'un rendement de 33 % à environ 50 % en utilisant, comme nous le verrons plus tard, des réacteurs à neutrons rapides fonctionnant à haute température. Malheureusement, pour cet exemple particulier, le remplacement d'une centrale nucléaire par une autre d'un type différent ne change en rien les émissions de CO₂ puisque aucune des deux n'en n'émet en fonctionnement.

Des innovations permettront sans doute de réduire les pertes totales à 25-30 % au lieu des 40 % actuels. Cela donnera, au niveau de l'énergie primaire, un facteur un peu inférieur à 2. Il faut ajouter à cela l'augmentation lente mais réelle de la consommation énergétique de la France qui aurait lieu en l'absence de tout changement et qu'il faudra compenser.

Ces estimations simples montrent que l'objectif du facteur 4 sur les émissions de CO₂ dans le domaine de l'énergie sera très difficile à atteindre d'ici 2050 car ce domaine évolue lentement. Plutôt que de décourager la population avec des objectifs qui ne pourraient être satisfaits qu'en économie de guerre, il vaudrait mieux lui proposer un programme réaliste avec une progression mesurée qui donnera au final de bien meilleurs résultats.

Toute réduction des émissions de gaz à effet de serre doit se faire à l'échelle mondiale. La France, avec 65 millions d'habitants ne représente que 1 % de la population mondiale mais contribue à hauteur d'environ 1,3 % aux émissions des gaz à effet de serre. Si demain les émissions de la France étaient réduites à zéro sans que les autres pays ne prennent de mesures, l'impact sur la planète serait quasiment nul. Même si l'on doit montrer l'exemple, il faut que la majeure partie de la population mondiale accepte de réduire ses émissions. Si l'on prend la limite des 500 kg de carbone par habitant et par an citée plus haut, la plupart des pays sont au-dessus, même la Chine qui pourtant émet peu par habitant. Seuls les pays très pauvres comme le Bangladesh sont au-dessous de ce seuil et pourraient légèrement augmenter leurs émissions.

La Chine est maintenant le plus gros émetteur de gaz à effet de serre de la planète (2,8 Gt de CO₂ venant de l'utilisation des combustibles fossiles et de la fabrication du ciment). Ces émissions ont très vite augmenté au cours du temps car beaucoup des objets manufacturés que nous utilisons viennent de Chine. De manière générale, les pays occidentaux ont externalisé une partie de leurs émissions dans les pays émergents. Ils ont ainsi diminué leurs émissions mais ont aussi perdu les emplois correspondants.

En deux mots

En France, il faut réduire nos émissions de gaz à effet de serre, en sachant toutefois ce qui est possible et ce qui ne l'est pas. Atteindre un facteur 4 est un objectif très probablement irréalisable d'ici 2050, sauf si des événements dramatiques nous y contraignent. En revanche, un facteur voisin de 2 ou un peu plus est un objectif ambitieux mais atteignable. Il

est suffisant pour que la France limite ses émissions à 2 tonnes de CO₂ par habitant, ce qui est l'objectif mondial. Il vaut donc mieux se fixer un objectif que l'on est susceptible d'atteindre plutôt qu'un objectif inaccessible. En effet cela risque de décourager et de tétaniser les populations qui au final feront peu d'efforts.

Le facteur deux de réduction global de l'énergie consommée en France envisagé par la loi de transition énergétique de 2015 paraît aussi utopique qu'injustifié. La France peut consommer une quantité d'énergie proche de la valeur actuelle, en transférant une partie de la consommation d'énergie pour le chauffage et de celle pour les transports vers une électricité décarbonée.

13. Capture et stockage du CO₂ : le compte n'est pas bon

Il n'existe pas de solution pour remplacer à court terme les combustibles fossiles à un coût économiquement acceptable. Ils représentent depuis des décennies environ 80 % de l'énergie primaire commerciale utilisée dans le monde. Petit à petit il faudra apprendre à s'en passer car les réserves sont finies mais à une échelle de temps beaucoup plus longue que celle nécessitée par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le charbon, qui est une source d'énergie de plus en plus utilisée, contribue largement à l'émission de CO₂ ainsi qu'à des polluants nuisibles pour la santé ou l'environnement.

Comme il semble difficile de se passer aujourd'hui des combustibles fossiles, on peut essayer de le capturer pour le stocker dans des formations souterraines étanches. Ceci ne pourrait être fait que dans des installations centralisées grosses émettrices de CO₂. En effet, il n'est pas possible, pour des raisons pratiques et économiques, de capturer le CO₂ émis dans de petites installations ou émis par les véhicules.

Quelles solutions?

En 2013, les émissions de CO₂ issues de la combustion de combustibles fossiles étaient de l'ordre de 34 Gt. Si l'on admet que les processus naturels en absorbent environ la moitié, il reste de l'ordre de 17 Gt en excès dans l'atmosphère pour la seule année 2013. La capture du CO₂ et son traitement ne peuvent se faire que pour de grosses installations. On ne pourra pas capturer la 1,8 tonne émise par une voiture particulière parcourant 15 000 km dans l'année et émettant 120 g de CO₂ par km.

On peut envisager deux solutions :

- Capturer le CO₂ émis, le transporter et le stocker dans des cavités géologiques. C'est actuellement la solution étudiée à grande échelle.
- Minéraliser le CO₂ en le transformant en un produit solide que l'on pourrait facilement stocker ou utiliser. C'est ce que fait la nature depuis que la terre s'est formée et ce CO₂ se retrouve sous forme de roches calcaires. Toutefois, l'échelle de temps se chiffre en millions d'années. Pour les activités humaines il faudrait réaliser ce processus rapidement mais il demande aussi beaucoup d'énergie. Des recherches sont néanmoins menées dans ce sens.

Capture du CO₂

On ne peut capturer le CO₂ que dans de grandes installations centralisées comme des centrales thermiques fonctionnant avec des combustibles fossiles ou des cimenteries. Trois technologies sont possibles comme cela est illustré dans la figure 1 :

- La **capture postcombustion** consiste à extraire le CO₂ des fumées de combustion. Il existe plusieurs méthodes pour faire cela. Elles utilisent des produits chimiques et requièrent de l'énergie.
- La **capture par oxycombustion** consiste à séparer l'oxygène de l'air avant la combustion, par exemple par cryogénie. La combustion se fait alors avec de l'oxygène pur.

Cette technologie est coûteuse en énergie. Pour une centrale à charbon, par exemple, cela représente environ 15 % de l'énergie produite par la centrale.

- La **capture par précombustion** consiste à transformer le combustible initial en un gaz de synthèse (mélange d'oxyde de carbone, CO, et d'hydrogène, H₂) par vaporeformage (avec de la vapeur d'eau) ou par oxydation partielle avec de l'oxygène. L'oxyde de carbone produit est transformé en CO₂ et hydrogène au cours d'une réaction avec de la vapeur d'eau appelée « shift-conversion ». Le CO₂ et l'hydrogène sont alors séparés et H₂ est utilisé comme combustible.

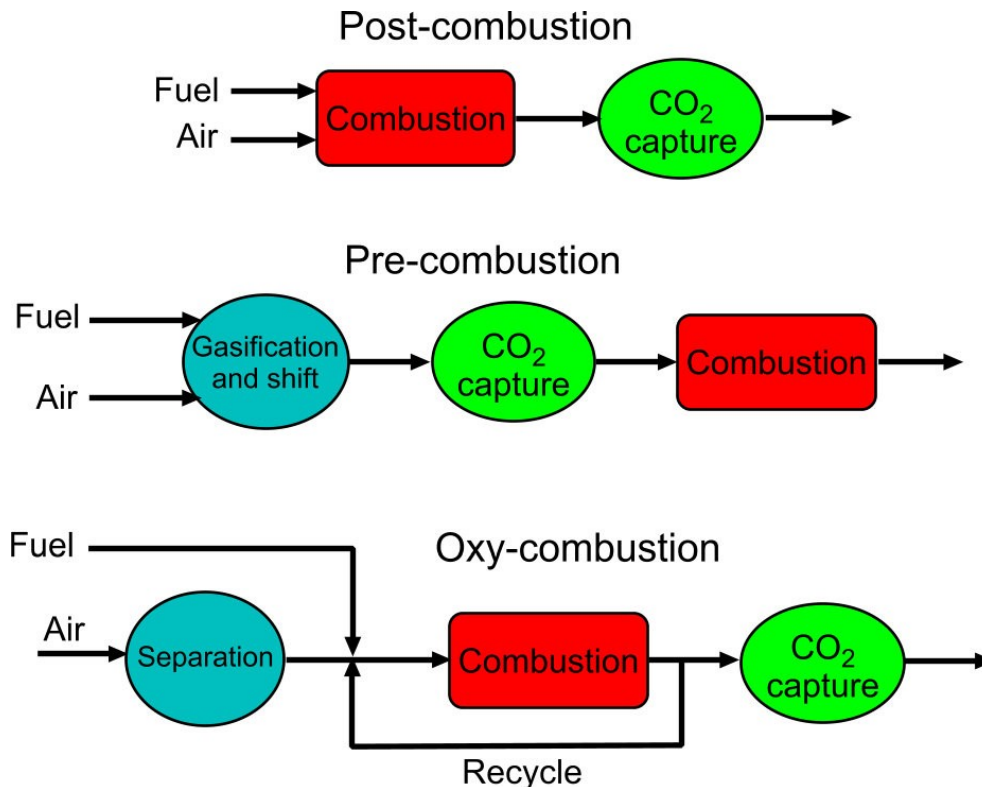


Figure 1. Principe des technologies possibles pour capturer le CO₂ dans des centrales thermiques fonctionnant avec des combustibles fossiles.

Ces trois technologies demandent de l'énergie et créent du CO₂. Cette étape conduit à une diminution du rendement de la centrale thermique qui fait qu'elles ne sont intéressantes que pour les nouvelles générations de centrales.

Transport du CO₂

Dans la majorité des cas, le CO₂ ne peut être stocké sur place, comme dans le cas du site de Sleipner en mer du Nord, et doit être transporté sur le site de stockage. Cela peut se faire par gazoduc ou par bateau. Dans les deux cas cela consomme de l'énergie et peut générer des émissions supplémentaires (cas des bateaux, par exemple).

Stockage du CO₂

La solution la plus raisonnable est le stockage géologique. Trois solutions sont possibles (figure 2) :

- Les aquifères profonds contenant de l'eau salée. Ils pourraient stocker entre 400 et 10 000 milliards de tonnes de CO₂.
- Les gisements de pétrole ou de gaz naturel épuisés ou en passe de l'être. On utilise déjà parfois l'injection de CO₂ pour améliorer le taux de récupération d'un puits de pétrole.
- Les veines de charbon inexploitées mais il peut parfois être difficile d'y injecter du CO₂.

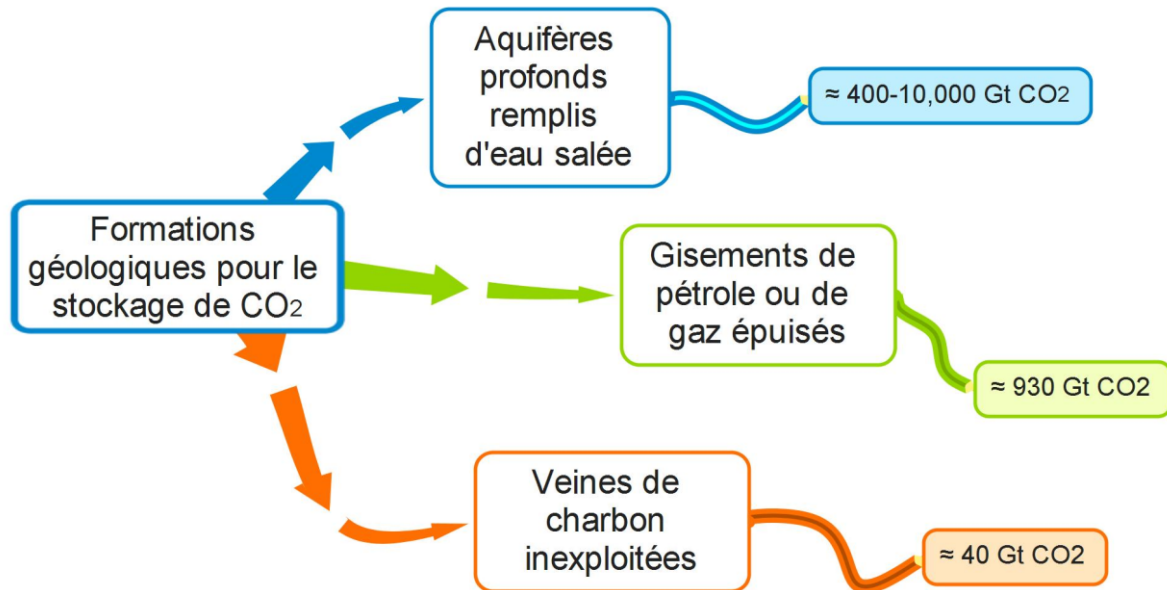


Figure 2. Formations géologiques possibles pour stocker le CO₂.

Le CO₂ est dans un état supercritique au-dessus de 31 °C et 74 bars de pression. Si on l'injecte dans des réservoirs situés à grande profondeur (supérieure à 700 à 900 mètres) il est à l'état supercritique et le volume occupé est plus faible. La présence d'eau peut amorcer des processus géochimiques lents conduisant à une minéralisation d'une partie du CO₂.

Le stockage doit être pérenne sur un ou deux milliers d'années. En effet, l'évolution du climat est lente car il est lié à la circulation océanique qui a une échelle de temps très longue. En fait lorsque les combustibles fossiles seront pratiquement épuisés, les émissions de CO₂ dans l'atmosphère deviendront plus faibles. Lors de l'apparition de la prochaine ère glaciaire, on pourra relâcher ce CO₂ piégé pour en atténuer l'ampleur.

Est-ce réaliste

Les phénomènes naturels absorbent environ la moitié du CO₂ rejeté par les activités humaines. Le reste, environ 17 Gt de CO₂ chaque année, reste dans l'atmosphère. Si l'on voulait simplement capturer chaque année 10 % de ces émissions, il faudrait construire plus de 1 500 usines ayant la capacité de celles existant aujourd'hui (1 Mt de CO₂ par an). Cela représenterait la construction de 3 à 4 unités de stockage de 1 Mt de CO₂ chaque jour si l'on voulait faire cela en une année. C'est une tâche irréalisable compte tenu des connaissances actuelles du sous-sol, de l'acceptabilité des habitants vivant près des sites de stockage qui

voudront l'assurance d'une sécurité absolue, du manque de moyens humains pour réaliser ces installations et de la hauteur des investissements nécessaires. Si d'ici le milieu du siècle on est capable de capturer et stocker quelques pourcents de la production de CO₂ due aux activités humaines, ce sera déjà un succès. On est donc loin de l'image dans laquelle la majorité du CO₂ produit par l'homme et non absorbé par la nature pourrait être stockée. Le stockage du souterrain du CO₂ est donc plus une intention pour faire croire qu'on peut résoudre le problème qu'une solution réaliste. Cela permet de se donner une bonne conscience pour continuer à émettre du CO₂

Toxicité du CO₂

Pendant longtemps on a pensé que le gaz carbonique n'était qu'un gaz asphyxiant qui agissait de manière physique en diminuant la fraction inspirée d'oxygène. En fait, le CO₂ a aussi des effets physiologiques pouvant conduire à la mort s'il est en concentration suffisante.

Lorsque sa concentration dans l'air atteint 5 %, la ventilation pulmonaire est multipliée par 3 et le débit de l'artère carotide augmente de 30 %. Dès 7 % on peut observer divers signes inquiétants : céphalée, anxiété, fatigue intense, troubles visuels, palpitations, douleurs thoraciques, etc. Ces signes sont des alarmes dont il faut tenir compte.

Si la concentration atteint 15 %, il y a des pertes de connaissance sans symptôme annonciateur. Des convulsions et des arrêts respiratoires arrivent lorsque la concentration atteint 20 % et, au-delà d'une concentration de 30 % c'est la mort certaine.

Pour illustrer la toxicité du CO₂, rappelons que le 21 août 1986, 1 km³ de CO₂ a été libéré naturellement du lac Nyos situé au Cameroun conduisant à 1 746 morts. Un autre exemple moins dramatique est celui de l'intoxication au CO₂ survenu dans un établissement de restauration rapide suite à une fuite de CO₂ dans le système carbonatation et de soutirage des boissons. Cette toxicité fera qu'il sera difficile de convaincre les populations d'accepter d'être près d'un lieu de stockage, même si le risque d'un accident est très faible.

En deux mots

Il est peu probable que l'on soit capable de réaliser suffisamment d'installations de stockage pour réduire suffisamment les émissions de CO₂ provenant des activités humaines par ce moyen d'ici le milieu du siècle. La capture et le stockage du CO₂ est une bonne idée mais c'est surtout une bonne excuse pour continuer à utiliser les combustibles fossiles sans chercher à les économiser. On peut ainsi construire des centrales au charbon en disant qu'elles sont prêtes à capturer le CO₂.

14. Hydrocarbures non conventionnels

L'exploitation récente des gaz et pétroles de schiste a profondément modifié la géopolitique mondiale du secteur de l'énergie. Jusqu'à récemment, on exploitait principalement les hydrocarbures dits conventionnels, pétrole ou gaz naturel, faciles à récupérer des réservoirs dans lesquels ils sont piégés et présents en grande concentration. Depuis le début du siècle on exploite de plus en plus d'hydrocarbures dits non conventionnels qui nécessitent d'intervenir sur le réservoir dans lequel ils sont piégés ou qui, n'ayant pas atteint la maturité requise doivent être traités⁴.

Les hydrocarbures sont issus d'une faible partie de la biomasse marine qui a sédimenté au fond des mers, en l'absence d'oxygène, mélangée avec du sable fin des boues argileuses. Ces sédiments, riches en matière organique, vont peu à peu s'enfoncer sous le poids d'autres sédiments qui se déposent au-dessus. Au fur et à mesure que les sédiments s'enfoncent, la température et la pression augmentent. On obtient une roche, la **roche mère**, dans laquelle la matière organique s'est décomposée et transformée en **kérogène**, substance intermédiaire entre la matière organique et les hydrocarbures. Sous l'action de la température et de la pression, le kérogène se transforme en hydrocarbures. Entre 2 000 et 3 000 mètres de profondeur on obtiendra du pétrole, au-dessous ce sera du gaz naturel car la température est plus importante et les longues molécules sont peu à peu cassées en molécules plus petites (cracking). Il y a une situation intermédiaire dans laquelle on forme à la fois du pétrole et du gaz.

Comme ils sont plus légers que l'eau, les hydrocarbures de la roche mère peuvent migrer vers la surface. S'ils rencontrent une couche imperméable, ils resteront piégés dessous dans la roche poreuse et perméable. C'est ce que l'on appelle la **roche-réservoir** ou le **réservoir**. Cette roche va accumuler de grandes quantités d'hydrocarbures formant les gisements que l'on exploite aujourd'hui ou que l'on découvrira demain.

Hydrocarbures de roche mère et de réservoirs compacts

Les différents hydrocarbures non conventionnels sont indiqués dans la figure 1. Nous ne parlerons pas des agrocarburants (biocarburants) ni des procédés CTL (coal-to-liquids), BT (biomass-to-liquids) et GTL (gas-to-liquids) basés sur la synthèse d'hydrocarbures à partir du procédé Fischer-Tropsch. Nous ne parlerons pas non plus des pétroles lourds ou ultra-lourds (dans lesquels on inclut les solides comme les bitumes ou asphaltes).

Certains hydrocarbures ont migré de la roche mère vers un piège mais celui-ci peut être très peu perméable. C'est le cas des pétroles et gaz de réservoirs compacts (tight oil, tight gas).

D'autres hydrocarbures formés à partir du kérogène n'ont pas pu migrer et restent piégés dans la roche mère qui est encore moins perméable que les réservoirs compacts. Ce sont les

⁴ Pour plus de détails, voir l'excellent livre de P.R.Bauquis, « Parlons gaz de schiste en 30 questions », la documentation Française, 2014.

pétroles de schiste (shale oil) et les gaz de schiste (shale gas). La présence de pétrole ou de gaz dépend de la profondeur à laquelle est enfouie la roche mère.

Les hydrocarbures non conventionnels situés dans la partie droite de la figure 1 appartiennent donc à deux familles :

- Ceux issus de réservoirs très peu perméables (moins perméables que la brique) que l'on appelle réservoirs compacts,
- Ceux contenus dans la roche mère qui est un milieu encore moins perméable que la roche des réservoirs compacts.

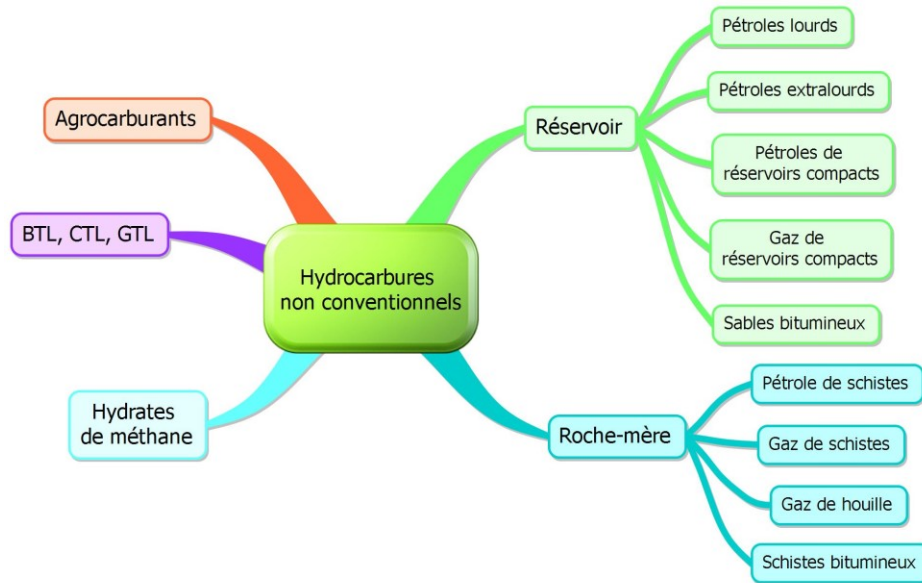


Figure 1. Hydrocarbures non conventionnels.

Comme les hydrocarbures non conventionnels sont piégés dans des roches compactes très peu perméables, il faut, pour les extraire, **stimuler** ces roches afin qu'ils puissent s'écouler et remonter vers la surface où ils seront collectés. Ceci se fait aujourd'hui par **fracturation hydraulique**.

Parfois, la roche mère n'est pas enfouie à une profondeur suffisante pour que le kérogène se transforme en pétrole ou en gaz. Il s'agit alors de schistes bitumineux (oil shale⁵). Ceux-ci s'exploitent en carrières de manière très polluante. Pour obtenir du pétrole, il faut faire le travail de pyrolyse que la nature n'a pas fait en les chauffant à haute température (environ 500 °C) en l'absence d'air. Les États-Unis, le Brésil et la Russie possèdent la majorité des réserves.

La fracturation hydraulique

Entre les années cinquante et quatre-vingt, la technique pour extraire des hydrocarbures de roche mère, qui est un milieu très peu perméable, a été d'utiliser des explosifs. L'URSS a même utilisé une bombe atomique dans les années soixante-dix. Le rendement obtenu était très faible. Deux innovations ont permis de les exploiter de façon plus efficace. La première est le **forage horizontal**, développé à partir de cette époque, qui a permis de traverser des

⁵ Il ne faut pas confondre **shale oil** (pétrole ou huile de schiste) et **oil shale** (schiste bitumineux).

régions de roche mère beaucoup plus importantes comparées au forage vertical classique. La seconde ; dans les années 2000, est la **fracturation hydraulique**. Ces deux techniques, utilisées simultanément, ont permis d'exploiter de manière intensive les pétroles et gaz de roche mère.

Le principe de la fracturation hydraulique est illustré dans la figure 2.

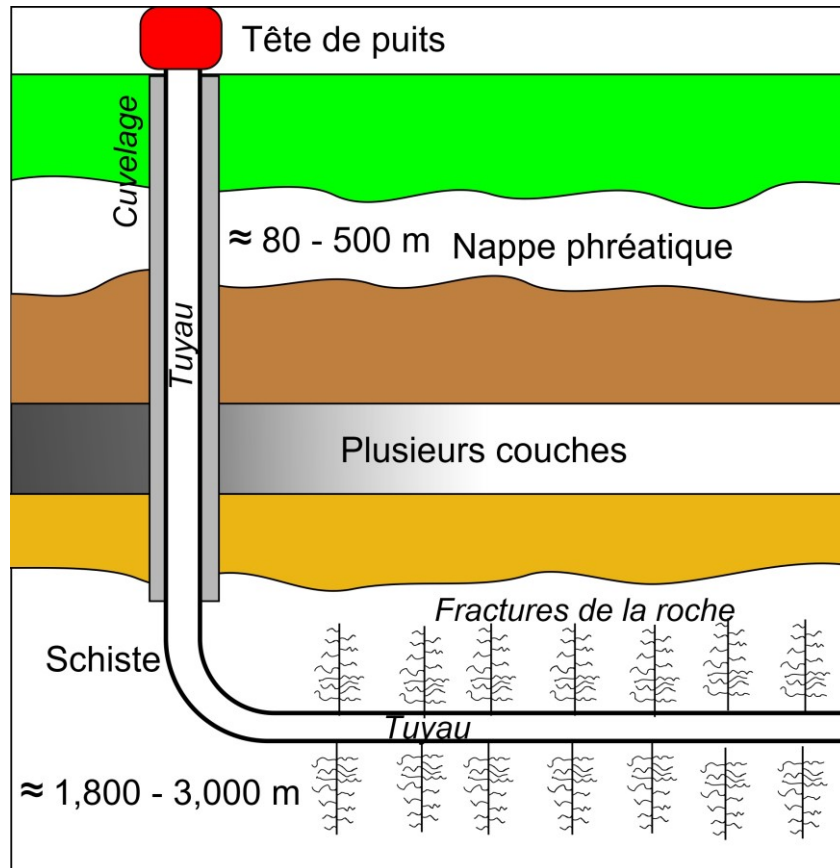


Figure 2. Principe de la fracturation hydraulique.

Les microfissures créés lors de la fracturation hydraulique ont la taille d'un cheveu. Le fluide utilisé est essentiellement de l'eau et du sable (98 %) et contient 2 % d'additifs qui permettent d'améliorer la fracturation (produits anticorrosion et antibactériens, stabilisateurs, anti-mousses, etc.). Certains de ces composés sont présents dans les produits alimentaires.

Impact de la fracturation sur l'environnement

La fracturation hydraulique consomme beaucoup d'eau, entre 5 000 et 20 000 m³ par puits selon les conditions. C'est typiquement une centaine de fois plus que la quantité utilisée pour les hydrocarbures conventionnels mais cent fois moins que la quantité d'eau nécessaire pour obtenir des biocarburants. Cette eau peut être recyclée et ne doit pas être rejetée sur le site car elle s'est chargée en sels minéraux présents dans la roche mère et des produits chimiques du fluide de fracturation. La zone de fracturation et la nappe phréatique sont à des profondeurs très différentes et un risque de pollution de cette dernière peut venir d'une mauvaise étanchéité du forage au niveau de la nappe phréatique. L'autre source de pollution est un rejet inconsidéré des eaux d'usage revenues en surface. Plus de 100 000 puits de

roches mères ont été forés aux États-Unis et le nombre d'incidents est extrêmement faible, la plupart du temps dus à un non-respect de la réglementation.

La fracturation crée aussi des micro-ondes de choc. Les secousses sismiques associées sont faibles, identiques à celles que l'on peut ressentir lors du passage d'un métro souterrain (typiquement, de degré 2,5 sur l'échelle de Richter). La fracturation hydraulique est aussi appliquée en géothermie profonde comme à Soultz-les-Forêts, en Alsace, ou près de Bâle. Comme elle est réalisée sur des roches cristallines, on peut observer des effets sismiques plus importants (jusqu'à 5 sur l'échelle de Richter⁶) qui ont conduit à la fissuration de quelques bâtiments.

Il faut environ cent à deux cents fois plus de puits non conventionnels pour produire la même quantité de gaz ou de pétrole qu'un puits conventionnel. Parfois, cela peut même atteindre le millier si l'on considère des puits exceptionnels comme ceux exploités au Moyen-Orient. L'impact sur l'environnement est donc de ce fait beaucoup plus important que dans le cas des gisements conventionnels.

Les hydrates de méthane

Les hydrates de méthane sont du méthane piégé dans une structure cristalline de glace semblable à une cage (clathrate). Ils sont présents en grande quantité dans les fonds marins et dans le permafrost (sol gelé). On ne sait pas actuellement exploiter cette ressource. Il y a de grandes incertitudes sur les réserves mais elles pourraient être considérables (supérieures à celles du gaz naturel). En cas de réchauffement climatique important, le danger est une libération partielle du méthane dans l'atmosphère ce qui aurait comme conséquence une amplification du réchauffement. Un kilogramme d'hydrate de méthane contient environ 100 g de méthane. Le méthane est, à volume égal, plus de vingt fois plus nocif pour l'effet de serre que le CO₂.

Fracturer ou pas ?

La fracturation hydraulique est interdite en France alors qu'il y a sans doute des réserves importantes dans le sous-sol. Si l'exploitation ou non de ces réserves est un choix politique, il peut paraître absurde de ne pas mener des recherches sur la fracturation hydraulique afin de maîtriser cette technologie, de l'améliorer ou d'en trouver une autre plus respectueuse de l'environnement. Il est intéressant de connaître le potentiel des réserves même si on ne les exploite pas tout de suite. Pour le gaz de schiste, La France a choisi de rester dans l'inconnu et de ne pas savoir ce que contient son sous-sol. Dans une période où l'essentiel du déficit commercial provient des combustibles fossiles c'est un choix discutable mais l'inquiétude compréhensible et le rejet total par certaines régions concernées ne doivent pas être minimisés.

En deux mots

Les hydrocarbures non conventionnels sont une ressource d'énergie fossile qui permet de retarder la disparition ou la raréfaction des énergies fossiles. Leur exploitation est donc

⁶ L'augmentation d'un degré sur l'échelle de Richter (par exemple en passant de 3 à 4) augmente l'énergie du séisme d'un facteur 30 et l'amplitude du mouvement d'un facteur 10.

compréhensible. Dans la plupart des régions du monde les réserves sont mal connues et basées sur des estimations. Selon le pays, la législation relative au sous-sol n'est pas la même. Aux États-Unis, la ressource existant dans le sous-sol appartient au propriétaire du terrain ce qui n'est pas le cas en France. Ceci explique en partie le développement important des exploitations de gaz ou de pétrole de schiste aux États-Unis puisque le propriétaire y trouve un avantage financier direct alors qu'en France ce serait plutôt une expropriation. Le Royaume-Uni réfléchit actuellement à un intéressement financier direct des ménages situés près de champs d'exploitation de gaz de schiste si ceux-ci étaient mis en exploitation. Il semble en effet normal que les habitants proches de telles installations aient des avantages pour compenser les inconvénients divers liés à l'exploitation de cette source d'énergie (impacts lors du forage, dégradation de l'image touristique d'une région, etc.).

Il est important de mieux connaître le sous-sol et les réserves potentielles qu'il contient. Il faut aussi étudier des techniques alternatives à la fracturation hydraulique qui soient plus respectueuses de l'environnement. Ceci demande des recherches mais ouvre aussi la possibilité de nouveaux marchés pour les industriels.

15. Le nucléaire est-il utile ?

Le nucléaire est une source d'énergie jeune qui fournit de l'électricité à grande échelle depuis à peine plus d'un demi-siècle. Il est basé sur la fission contrôlée d'un isotope particulier de l'uranium : l' ^{235}U . Celui-ci est présent à 0,7 % dans l'uranium naturel qui est composé à 99,3 % d' ^{238}U , un autre isotope.

Fission

L' ^{235}U capture très facilement des **neutrons thermiques** (ou **lents**), c'est-à-dire ayant une énergie moyenne correspondant à la température du milieu dans lequel ils se propagent. Après capture, on obtient un noyau d' $^{236}\text{U}^*$ excité qui se casse en deux en émettant 2 ou 3 neutrons selon les cas : c'est le processus de **fission**. Ce processus libère de l'énergie dont une partie est utilisée pour produire de la chaleur et ensuite de l'électricité. Les deux morceaux résultant de la rupture du noyau d' $^{236}\text{U}^*$ sont les **fragments de fission**. Il y a un gros noyau et un autre plus petit car la fission est asymétrique.

Les neutrons émis au cours de la fission ont une grande énergie cinétique mais ils peuvent être ralentis par le milieu et capturés par des noyaux d' ^{235}U . **On a une réaction en chaîne** puisque si tous les neutrons sont utilisés on fissionne de plus en plus de noyaux. Dans ce cas le nombre de neutrons double à chaque génération et le système diverge rapidement. Mais tous les neutrons produits lors de la fission n'induisent pas une nouvelle fission. Ils peuvent s'échapper du milieu si la taille de celui-ci est trop petite. Ils peuvent aussi être capturés par d'autres noyaux présents dans le milieu.

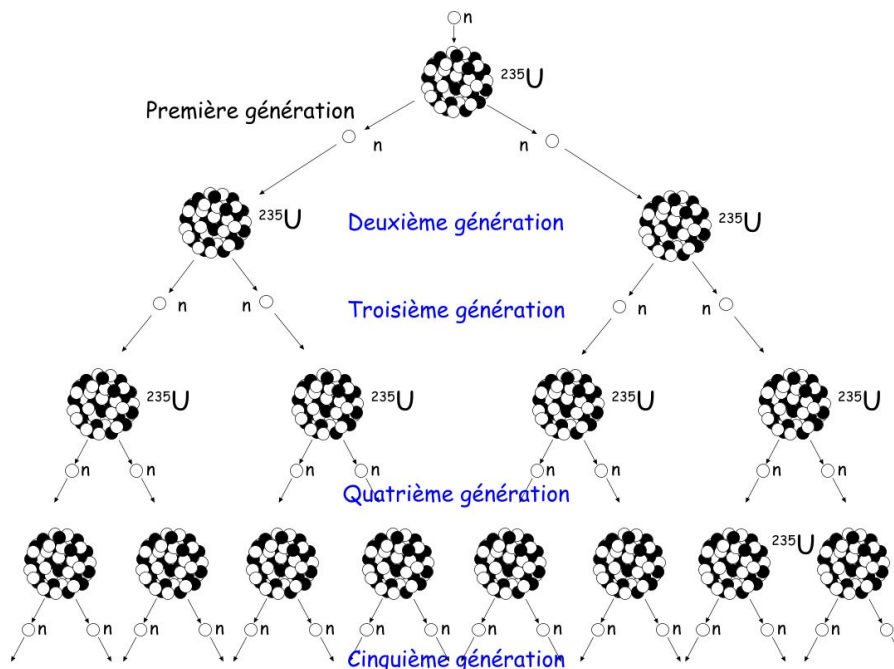


Figure 1. Représentation schématique d'une réaction en chaîne de fission.

Le **coefficient de multiplication neutronique** k est le rapport entre le nombre de neutrons d'une génération et celui de la précédente. Trois cas se présentent alors :

- si $k > 1$ le milieu est dit **surcritique** : le nombre de neutrons croît exponentiellement.
- si $k < 1$ le milieu est dit **sous-critique** et les réactions de fission s'arrêtent spontanément.
- si $k = 1$ le milieu est dit **critique**.

Dans un réacteur nucléaire il faut, au démarrage, être légèrement surcritique puis, lorsque la puissance nominale est atteinte, être juste critique. Le pilotage du réacteur se fait grâce à l'existence de **neutrons retardés** dont nous parlerons plus bas.

Réacteur nucléaire

Dans un réacteur nucléaire on entretient une réaction en chaîne de fission induite par des neutrons. La majorité des réacteurs nucléaires utilisés dans le monde sont des **réacteurs à neutrons lents**.

Les **réacteurs à neutrons lents** ou **réacteurs thermiques** utilisent l' ^{235}U comme combustible et sa grande probabilité d'absorber les neutrons lents. Comme la majorité des neutrons émis lors de la fission de l'uranium sont des neutrons rapides, il faut les ralentir. C'est le rôle du **modérateur**. Le ralentissement des neutrons se fait par collisions élastiques avec les noyaux du modérateur. Le ralentissement est d'autant plus efficace que les noyaux du modérateur sont légers. Il faut de plus que les noyaux de modérateur absorbent peu les neutrons sinon ils en font disparaître une partie et le milieu peut devenir sous-critique.

Grâce à l'hydrogène qu'il contient, **l'eau est le modérateur le plus efficace** puisqu'il suffit d'environ 19 collisions pour thermaliser un neutron de fission. Son inconvénient est d'en absorber une partie. Pour compenser cela, on utilise un combustible enrichi en ^{235}U ($\approx 3-4\%$). L'eau lourde, dans laquelle l'atome de deutérium remplace l'atome d'hydrogène, absorbe moins les neutrons mais est un moins bon modérateur puisqu'il faut environ 35 chocs pour thermaliser un neutron de fission. On peut alors utiliser de l'uranium naturel comme combustible. Le graphite est aussi un modérateur possible car il absorbe faiblement les neutrons mais il faut environ 115 chocs pour la thermalisation.

Il y a actuellement 437 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde répartis dans 30 pays. Sur ce nombre, 90,9 % sont des réacteurs à eau. Ce fluide sert à la fois de modérateur et de fluide caloporteur pour extraire la chaleur produite. Cette famille est dominée par les réacteurs à eau sous pression, technologie utilisée par les 58 réacteurs français produisant de l'électricité.

La majorité des neutrons produits lors du processus de fission sont émis immédiatement. Ils proviennent des fragments de fission excités qui les émettent en se désexcitant. On les appelle des **neutrons prompts**. Si tous les neutrons produits étaient émis immédiatement, on ne pourrait pas contrôler un réacteur nucléaire car le système divergerait très vite (en une dizaine de microsecondes). Heureusement certains fragments ou leurs descendants passent d'abord par des états excités à vie longue et se désexcitent par émission de neutrons avec un certain retard. On appelle cette faible fraction de neutrons qui sont émis plus tard des **neutrons retardés**. La proportion de ces neutrons est faible, 0,65 pour mille pour l' ^{235}U , mais suffit pour pouvoir contrôler le réacteur. Aussi, peut-on être légèrement surcritique en neutrons retardés mais il faut toujours être sous-critique en neutrons prompts.

Intérêt économique

L'intérêt de l'énergie nucléaire est de pouvoir produire de l'électricité à coût modéré, ce dernier restant stable dans le temps. Comme la durée de vie d'un réacteur nucléaire est maintenant de 40 ans ou 60 ans, c'est un avantage économique pour un pays.

L'énergie nucléaire permet d'éviter des importations de combustibles fossiles. Avec un baril de pétrole à 80 dollars comme cela a été longtemps le cas, le pétrole nécessaire pour produire, en France, la même quantité d'électricité représenterait une somme d'environ 800 € par français et par an. C'est au niveau de la France de l'ordre du budget de l'éducation nationale. En effet, s'il n'y avait pas eu le premier choc pétrolier dans les années soixante-dix, il est fort probable que la France ait développé des centrales au fuel. En effet, le prix du baril de pétrole brut était inférieur à quelques dollars avant le choc pétrolier mais, entre octobre 1973 et janvier 1974, le prix du baril de brut a été multiplié par quatre (il avait été multiplié même par sept pendant quelques semaines). Par ailleurs, à cette époque, le gaz naturel n'était pas utilisé comme source d'énergie pour produire de l'électricité. C'est à cette époque que la France a décidé de lancer son programme nucléaire pour produire de l'électricité et réduire en partie sa dépendance énergétique vis-à-vis du Moyen-Orient.

En 2015-2016, le pétrole n'est pas cher (aux alentours de 30-40 \$ le baril) mais cette situation a peu de chance de perdurer lorsque le monde sera sorti de sa crise économique et que les réserves en combustibles fossiles diminueront.

Toutefois, l'énergie nucléaire nécessite un investissement initial est élevé. Ceci est d'autant plus visible que la puissance d'un réacteur est élevée, 1 GW_e (Gigawatt électrique) ou plus.

Pas d'émission de CO₂

Un autre intérêt de l'énergie nucléaire est qu'il n'y a pas de rejet de CO₂ en fonctionnement. La production d'électricité par l'énergie nucléaire en Europe au lieu d'énergies fossiles permet d'éviter une quantité de CO₂ du même ordre de grandeur que celui rejeté par l'ensemble du parc automobile européen. La seule contribution en CO₂ vient de la construction des centrales, de l'extraction et enrichissement du combustible et du démantèlement.

Si au lieu de produire son électricité par l'énergie nucléaire la France la produisait avec des centrales à gaz naturel, cela correspondrait à des émissions de 3,3 tonnes de CO₂ par habitant et par an. Si cette quantité d'électricité était produite avec du charbon, ce serait pire : 7,5 tonnes de CO₂ par habitant et par an. Au niveau mondial, en quarante ans, les centrales nucléaires actuellement en service ont permis de gagner 0,1 °C sur la température moyenne du globe.

Réserves d'uranium

Pour toute source d'énergie il faut se poser le problème des réserves. Les réacteurs nucléaires utilisent de l'uranium pour fonctionner. L'uranium est un métal assez commun et sa concentration moyenne dans l'écorce terrestre est de 2,8 ppm, c'est-à-dire 2,8 g/t. Les roches sédimentaires en contiennent moins (\approx 2 ppm) que les roches granitiques (\approx 4 ppm). L'eau de mer en contient un peu : 0,003 ppm.

On exploite l'uranium lorsque la concentration du minerai est suffisamment importante pour que cela soit économiquement rentable au prix du moment. On considère qu'un minerai est pauvre s'il contient moins de 1 000 ppm d'uranium (0,1 %) et qu'il est riche s'il con-

tient par exemple 20 000 ppm (2 %). L'Australie qui a les réserves les plus importantes possède des minerais ayant une teneur de 0,5 kg/t. On trouve au Canada des mines ayant des concentrations de 200 kg/t.

La répartition des réserves selon les pays est indiquée dans la figure 1. On voit que le paysage est très différent de celui des combustibles fossiles.

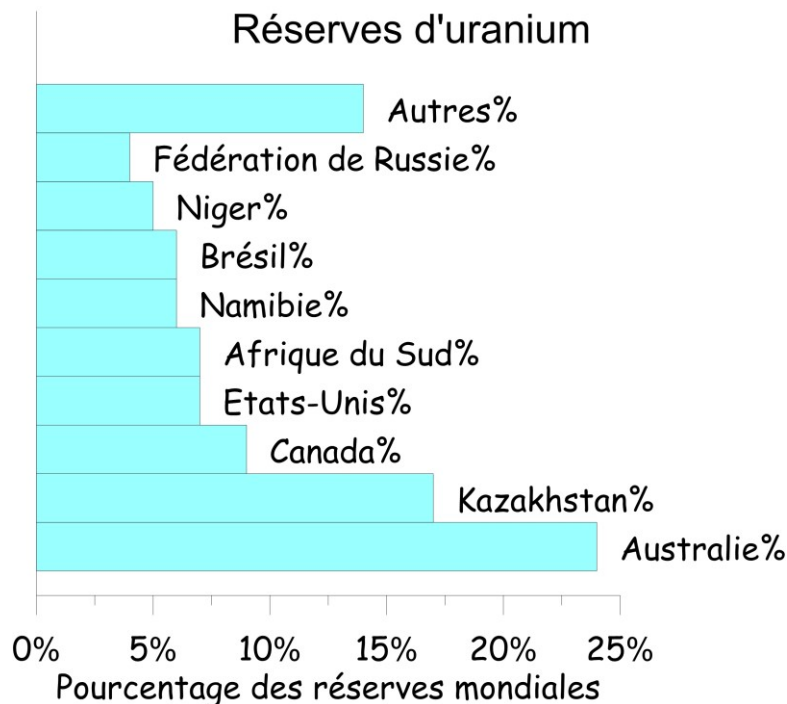


Figure 1. Réserves connues d'uranium dans le monde. Données de www.world-nuclear.org

Les 437 réacteurs déployés dans le monde consomment environ 64 000 tonnes d'uranium par an. Les réserves dépendent du prix que l'on souhaite mettre. Les réserves correspondant à moins de 130 dollars le kilo sont estimées à 3,3 millions de tonnes et à 4,7 millions de tonnes si des ressources supplémentaires, pour lesquelles il y a une forte probabilité de d'exploitation suite à des mesures d'échantillons, sont incluses. Au rythme de la consommation actuelle, cela ferait entre un demi et un siècle de consommation avec la technologie de réacteurs à neutrons lents. Toutefois, pendant très longtemps les efforts de prospection de l'uranium étaient faibles. Néanmoins, il faut changer de technologie pour mieux utiliser l'uranium naturel sinon cette filière a peu d'avenir. C'est le but des réacteurs à neutrons rapides dont nous parlerons dans le prochain chapitre. Il sera aussi possible, dans le futur de développer une filière basée sur le thorium qui est plus abondant que l'uranium sur la terre. L'Inde mène notamment des recherches sur cette filière.

Les déchets nucléaires

Comme toute activité industrielle, l'énergie nucléaire génère des déchets. Comme cette source d'énergie est très concentrée, le volume et la masse des déchets sont faibles comparés aux autres déchets industriels.

On produit en France environ 1 kg de déchets radioactifs par habitant et par an. Une grande partie vient de l'industrie nucléaire mais ils sont aussi produits dans certains laboratoires de

recherches ou dans les hôpitaux car des éléments radioactifs sont utilisés pour le diagnostic et dans certaines thérapies contre le cancer. Dans ce kilogramme, 10 g sont particulièrement radiotoxiques car ils contiennent des déchets à vie longue peu radioactifs qui peuvent être mélangés à des déchets à vie courte très radioactifs. La radioactivité des autres déchets (990 g) va décroître pour atteindre le niveau de la radioactivité naturelle avant 300 ans.

À titre de comparaison, on produit en France environ 2 500 kg de déchets industriels par habitant et par an. Parmi ceux-ci, 100 kg sont toxiques (métaux lourds, par exemple). Il y a aussi 150 000 tonnes de déchets d'activités de soins (en provenance du domaine médical) à risques, soit 2,5 kg par habitant.

Il existe des solutions technologiques pour gérer les déchets mais, pour ce qui est en particulier le cas des déchets à vie longue, il n'y a pas encore de décision politique pour une gestion définitive. Le plus simple est de les stocker en sous-sol, à grande profondeur. Pour certains d'entre eux (actinides mineurs), une solution est d'en brûler une grande partie dans le cœur de réacteurs à neutrons rapides lorsque ceux-ci seront opérationnels.

En deux mots

L'énergie nucléaire est un atout pour la France. Le parc existant permet d'importer beaucoup moins de combustibles fossiles, de ne pas émettre de CO₂ lors de la production d'électricité, d'avoir un grand nombre d'emplois qualifiés et bien payés en France, de produire de l'électricité à un coût stable et bas comparé à d'autres sources d'énergie. La sûreté en France est assurée et contrôlée par des organismes indépendants du producteur. Fermer des centrales nucléaires qui fonctionnent bien aggraverait la situation économique du pays et augmenterait substantiellement le prix de l'électricité sauf si on utilise des centrales au charbon ou au gaz naturel. Cependant, produire du courant électrique pour l'exporter est peu rentable avec les coûts actuels du marché et l'obligation d'accepter en priorité l'électricité produite par l'éolien et le photovoltaïque.

Pour le futur, le nouveau réacteur EPR va notablement augmenter le coût de production de l'électricité et le mettre au même niveau que celui de certaines énergies renouvelables, l'intermittence en moins. En effet, la technologie de l'EPR et de sa construction est très complexe sans que cette complexité soit toujours justifiée. L'avenir du nucléaire, qui se situe en grande partie en Asie, se fera avec des réacteurs plus simples et moins puissants, proches de ceux exploités aujourd'hui en France avec une sûreté améliorée. L'aveuglement de la France pour les réacteurs de type EPR risque de lui faire perdre des marchés, des emplois et de fragiliser la filière nucléaire française. On observe déjà, depuis quelques années, les grandes difficultés économiques et techniques rencontrées pour construire les quelques EPR commandés.

16. Les réacteurs nucléaires rapides

La technologie des réacteurs à neutrons lents n'utilise qu'une faible part de l'uranium naturel : l' ^{235}U présent à 0,7 % dans l'uranium naturel. Or l' ^{238}U (plus de 99 % de l'uranium naturel) peut être valorisé. C'est un noyau dit **fertile** car on peut le transformer en un noyau **fissile**, le ^{239}Pu (plutonium).

De l' ^{238}U au ^{239}Pu

L' ^{238}U peut capturer un neutron rapide et se transformer en ^{239}U qui se désexcite, avec une période⁷ de 23,5 minutes, en ^{239}Np . Ce dernier est radioactif, avec une période de 2,3 jours, et se décompose en ^{239}Pu dont la période est de 24 000 ans. Ainsi, en quelques jours, on fabrique du ^{239}Pu à partir de l' ^{238}U . Dans un réacteur à neutrons lents, le rendement est faible et il s'en forme peu. Une partie du plutonium formé dans un réacteur à neutrons lents est brûlée dans le réacteur mais il en reste dans le combustible usé qui contient aussi de l' ^{235}U imbrûlé.

Le combustible nucléaire resté 3 ans dans un réacteur à eau pressurisé français a typiquement la composition indiquée dans la figure 1. Les déchets ultimes sont les actinides mineurs et les produits de fission. Les autres éléments sont valorisables avec les réacteurs à neutrons rapides. Dans un réacteur à neutrons lents, on pourrait brûler, après retraitement du combustible, du ^{239}Pu et le peu d' ^{235}U présent dans l'uranium du combustible usé.

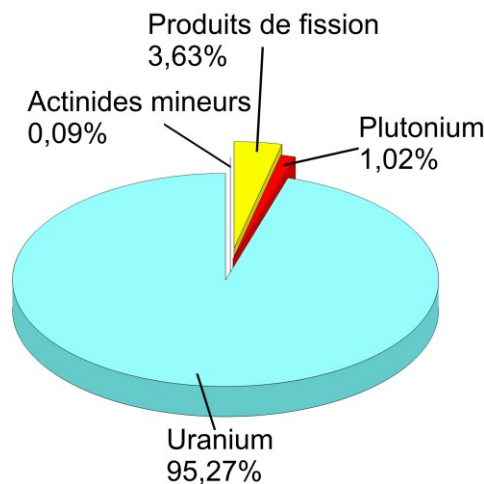


Figure 1. Composition typique d'un combustible usé ayant séjourné dans un réacteur à eau sous pression français pendant 3 ans.

⁷ La *période radioactive* permet de caractériser la durée de vie d'un noyau radioactif. Si l'on part de N noyaux radioactifs, au bout d'une période il n'en restera plus que $N/2$, la moitié. Chaque période divise par 2 le nombre de noyaux radioactifs.

Réacteur à neutrons rapides

Dans un réacteur à neutrons rapides, la fission du combustible est induite par des neutrons ayant une vitesse élevée. La probabilité de fissionner un noyau fissile est beaucoup plus faible. Par exemple, la probabilité de fissionner un noyau d' ^{235}U avec un neutron thermique dont l'énergie est de 1/40 d'eV est plus de 250 fois supérieure à la probabilité de fissionner un noyau de ^{239}Pu avec un neutron de 0,3 MeV, donc dix millions de fois plus énergétique. Il est donc nécessaire de maintenir un flux de neutrons élevé dans le cœur du réacteur, typiquement un ordre de grandeur supérieur à celui présent dans un réacteur à neutrons lents. De plus il faut que le combustible soit riche en éléments fissiles.

Le fluide caloporteur doit pouvoir efficacement évacuer la chaleur du cœur du réacteur, absorber le moins possible les neutrons et pouvoir travailler à haute température. La puissance volumique d'un réacteur rapide est de l'ordre de 100 à 250 MW/m³ car il y a une concentration importante de matière fissile dans le cœur (15-20 %). Elle est plus importante que pour les réacteurs à neutrons lents (50-100 MW/m³). Pour toutes ces raisons, le fluide caloporteur utilisé est souvent un métal (sodium comme dans Superphénix ou plomb) mais on peut aussi utiliser un gaz comme l'hélium qui a des propriétés intéressantes.

Un des avantages des réacteurs rapides est que l' ^{238}U peut capturer un neutron et subir une désintégration radioactive qui conduit au ^{239}Pu qui lui est un noyau fissile. On peut alors utiliser ce ^{239}Pu comme combustible dans des réacteurs à neutrons rapides. En entourant le cœur d'un réacteur à neutrons rapides avec de l' ^{238}U on peut, si les conditions opératoires sont bien choisies, à la fois produire de l'énergie dans le cœur mais aussi transformer de l' ^{238}U en ^{239}Pu : c'est le principe de la **surgénération**. On a ainsi une situation paradoxale dans laquelle on brûle du combustible dans le cœur et on en produit plus à l'extérieur. Dans un réacteur rapide, on peut atteindre des rendements de surgénération jusqu'à environ 1,2. Ainsi, en brûlant 100 noyaux de ^{239}Pu , on peut transformer 120 noyaux d' ^{238}U en ^{239}Pu . Au total on a donc 20 noyaux de ^{239}Pu en plus.

D'un autre côté, on peut choisir de configurer le réacteur pour incinérer certains déchets nucléaires à vie longue, comme les actinides mineurs, et diminuer ainsi la quantité de déchets nucléaires produits lors de la production d'électricité.

Les réacteurs à neutrons rapides fonctionnent à plus haute température que les réacteurs thermiques à eau pressurisée. Ces derniers ont un rendement de l'ordre de 33 % ce qui veut dire que pour 1 kWh d'électricité produit, on rejette 2 kWh de chaleur dans l'environnement. En fonctionnant à plus haute température, comme c'était le cas pour Superphénix par exemple (rendement \approx 41 %), on peut atteindre des rendements proches de 50 %. Dans ce cas on ne rejette que 1 kWh de chaleur pour 1 kWh d'électricité.

Pour démarrer, les réacteurs à neutrons rapides ont besoin de ^{239}Pu . Celui-ci est obtenu à partir de la filière à neutrons lents exploitée aujourd'hui. On ne pourrait pas démarrer une filière rapide sans plutonium ou ^{235}U fortement enrichi.

Les réserves

Les réacteurs rapides permettent de valoriser l' ^{238}U en le transformant en ^{239}Pu fissile. Or les réserves d' ^{238}U sont considérables par rapport à celles d' ^{235}U . Les 58 réacteurs français actuels ont besoin d'uranium enrichi à 3-4 % en ^{235}U . Cette opération est faite à partir de l'uranium naturel dans une usine d'enrichissement par diffusion gazeuse ou ultracentrifuga-

tion. On obtient en sortie une partie de l'uranium qui est enrichie ($\approx 3-4\%$) et l'autre appauvrie avec une teneur en ^{235}U d'environ $0,25\%$ au lieu des $0,7\%$ dans l'uranium naturel.

Une tonne d' ^{238}U permet de produire 1 GW_e pendant 1 an dans un réacteur à neutrons rapides alors qu'il faut 200 tonnes d'uranium naturel dans les réacteurs à eau sous pression actuels où l'on ne consomme réellement que $0,5\%$ de cet uranium. Le retraitement du combustible usé est toutefois indispensable pour pleinement exploiter l'énergie de l'uranium.

Avec les réacteurs à neutrons rapides on peut utiliser tous les noyaux de l'uranium naturel et non plus $0,7\%$. Les réserves sont ainsi multipliées par un facteur qui va dépendre de la manière dont on gère ces noyaux d'uranium mais qui peut être de l'ordre de 100 à 150. **Les réserves ne se chiffrent alors plus en centaines d'années mais en dizaines de milliers d'années.** Ainsi, avec la même quantité de combustible utilisé dans un réacteur actuel pendant 40 ans, on pourrait, avec des réacteurs nucléaires à neutrons rapides successifs, avoir de l'énergie pendant environ 5 000 ans. Les réserves d'uranium appauvri, résultant de l'enrichissement, présentes sur le sol français permettraient d'alimenter un parc de réacteurs nucléaires de même puissance qu'aujourd'hui (63 GW_e) pendant 5 000 ans.

La filière thorium

Tout comme l' ^{238}U , le ^{232}Th est un noyau fertile. Il peut capturer un neutron pour donner le ^{233}Th qui se désintègre par radioactivité bêta en ^{233}Pa avec une période de 22 minutes. Ce dernier noyau est aussi radioactif et donne de l' ^{233}U par désintégration bêta avec une période de 27 jours. L' ^{233}U est un noyau fissile. Toutefois, comme pour les réacteurs à neutrons rapides basés sur le couple $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$, les réacteurs d'une filière $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ ont besoin d' ^{235}U ou de ^{239}Pu pour pouvoir démarrer une première fois. Après, ils peuvent générer leur combustible par surgénération.

Le thorium est trois à quatre fois plus abondant dans l'écorce terrestre que l'uranium. On en trouve dans des pays comme l'Inde, le Brésil ou la Turquie qui sont des pays susceptibles de développer cette filière dans le futur. Les développements se font pour la plupart en Inde et en Chine.

La filière thorium est moins sujette à prolifération que la filière uranium. Elle génère moins de déchets radiotoxiques (pas d'actinides (transuraniens) et les transthoriciens sont beaucoup moins radioactifs). Cette filière peut aussi incinérer des déchets nucléaires à vie longue (transuraniens).

Le futur du nucléaire

Le déploiement des réacteurs à neutrons rapides ne se fera sans doute pas avant le milieu du siècle pour des raisons économiques et de développement. Il faut attendre que le prix de l'uranium augmente fortement. Or le prix de l'uranium naturel n'entre que pour une faible part dans le prix de l'électricité. En effet, une multiplication par dix du prix de l'uranium naturel augmente le prix de l'électricité de moins de 40% alors que ce serait d'un facteur 7 pour une centrale fonctionnant au gaz naturel si le prix de ce dernier était multiplié par dix.

Parmi les réflexions sur le futur du nucléaire, le forum international GENERATION IV, lancé en 2000 aux États-Unis regroupe dix pays, dont la France. Les technologies les plus prometteuses mises en avant par ce forum sont indiquées dans la figure 2. Elles comprennent à la fois des réacteurs à neutrons rapides et des réacteurs à neutrons lents.

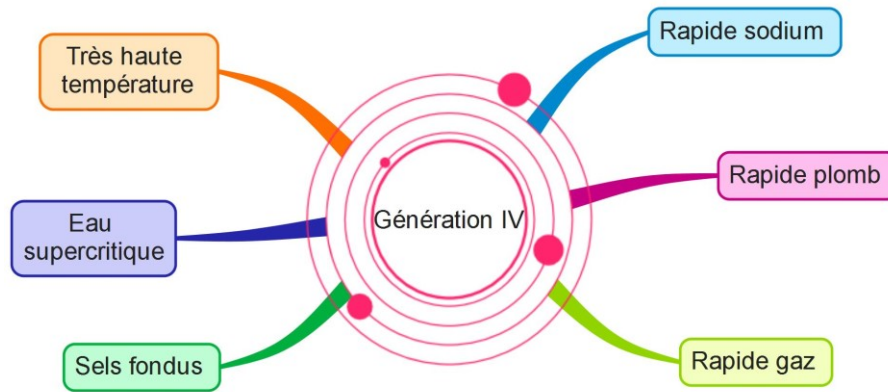


Figure 2. Technologies sélectionnées par le forum international GENERATION IV comme étant celles les plus prometteuses pour le futur.

Les réacteurs rapides à sodium sont ceux qui ont été le plus étudiés (Phénix, Superphénix, BOR-60, BN350, BN600, BN800, PFR, etc.) fonctionnant en cycle fermé⁸. Le plomb est une alternative au sodium pour des puissances plus faibles. Le rapide à gaz utiliserait de l'hélium comme caloporteur et fonctionnerait à 850 °C avec un rendement proche de 50 %. C'est sans doute la filière de réacteurs rapides refroidis au sodium qui a le plus de chance de se développer rapidement compte tenu de l'expérience passée dans ce domaine.

Trois autres types de réacteurs sont étudiés même s'ils ne sont pas des réacteurs à neutrons rapides. Le réacteur à très haute température utiliserait un caloporteur gaz et fonctionnerait en cycle ouvert avec des neutrons thermiques. La température de fonctionnement serait supérieure à 1 000 °C. Le réacteur à eau supercritique pourrait fonctionner soit avec des neutrons thermiques en cycle ouvert, soit avec des neutrons rapides en cycle fermé. Le réacteur à sels fondus fonctionnerait avec des neutrons épithermiques⁹. Les sels fondus servant à la fois de combustible et de caloporteur

En deux mots

Compte tenu des réserves en uranium disponibles, le nucléaire du futur sera forcément basé sur des réacteurs à neutrons rapides. Les réserves en uranium se chiffrent en dizaines de milliers d'années si l'on utilise les réserves connues mais, avec l'uranium contenu dans l'océan, on atteint des millions d'années. De plus, le thorium est présent en quantité supérieure à celle de l'uranium sur la terre et l'on peut développer des réacteurs rapides basés sur le couple $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$. La France, avec Superphénix et les réacteurs rapides qui l'ont précédé, a une bonne expérience pour développer une filière basée sur le sodium comme caloporteur. Il est important de mener rapidement à bien le prototype ASTRID dont le CEA est en charge pour développer une filière industrielle. Si ces développements sont freinés pour diverses raisons qui n'ont rien à voir avec la science, la France pourrait être amenée à ache-

⁸ Deux voies sont possibles pour le combustible utilisé d'un réacteur nucléaire. On peut l'entreposer puis le stocker en l'état. C'est ce que l'on appelle le **cycle ouvert**. On peut aussi séparer ce qui est valorisable de ce qui ne l'est pas et recycler une partie ou la totalité de ce qui a de la valeur. On dit alors qu'on est en **cycle fermé**. Dans ce cas il faut **retirer** le combustible utilisé pour en extraire les matières valorisables.

⁹ Les neutrons thermiques ont une énergie cinétique d'environ 0,025 eV. Les neutrons rapides ont une énergie cinétique supérieure à 0,5 MeV. Les neutrons épithermiques ont une énergie cinétique comprise entre 0,5 eV et 1 keV.

ter dans le futur des réacteurs rapides à l'étranger et augmenter sa dépendance énergétique. Réaliser ces réacteurs en souterrain pourrait favoriser leur acceptation par la société et augmenter leur sûreté à faible coût. Cela permettrait d'accélérer le programme d'industrialisation, en évitant qu'ils arrivent trop tard sur le marché mondial.

17. Démantèlement : faire simple plutôt que compliqué

Les réacteurs nucléaires, comme toute installation industrielle, ont une durée de vie finie (figure 1). Lorsqu'ils ne sont plus opérationnels il faut éliminer tout risque pour la population présente et future ainsi que pour l'environnement. L'option choisie aujourd'hui est de démanteler et réhabiliter le site.

Réacteurs en fin de vie

Le démantèlement est une opération longue et coûteuse qui va s'étendre sur des décennies. Pour le parc nucléaire français (58 réacteurs aujourd'hui) on estime qu'elle coûtera de l'ordre de 30 à 40 milliards d'euros.

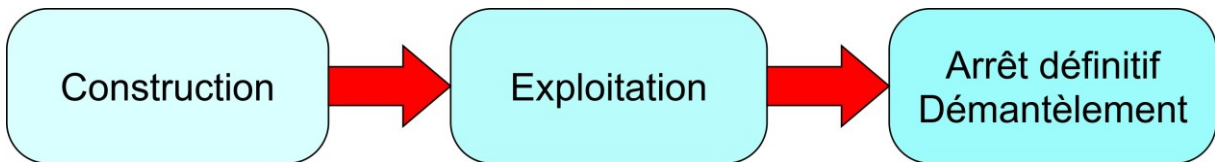


Figure 1. Les trois étapes de la durée de vie d'une installation.

Environ 140 réacteurs nucléaires sont actuellement arrêtés ou en cours de démantèlement au niveau mondial (figure 2).

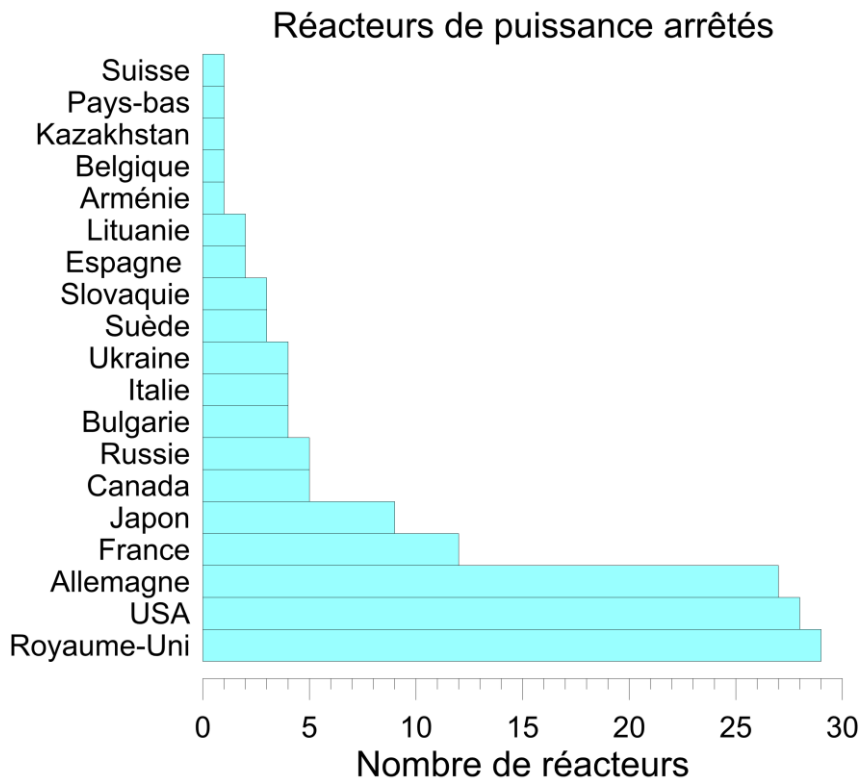


Figure 2. Nombre de réacteurs nucléaires de puissance arrêtés ou en démantèlement en 2015 selon le pays. Données IRSN.

Les réacteurs nucléaires sont fermés pour trois raisons différentes.

- Pour des raisons économiques (fin de vie et remise en état trop coûteux, rentabilité). Cela concerne près d'une centaine d'entre eux.
- Par des choix politiques, soit du pays (exemple l'Italie ou l'Allemagne avec l'abandon du nucléaire), soit imposé par une instance supranationale (exemple la Bulgarie, l'Arménie, la Lituanie ou la Slovaquie pour satisfaire aux conditions d'accès à l'Union Européenne).
- Suite à des incidents sérieux ou accidents.

Stratégies de démantèlement

Trois stratégies de démantèlement sont possibles (figure 3). Le démantèlement immédiat a été choisi par la France, la Belgique ou l'Espagne. Son intérêt est de ne pas trop reporter dans le futur les dépenses de démantèlement. Le démantèlement différé attend que la radioactivité diminue avant d'entreprendre la déconstruction du réacteur. C'est la stratégie choisie par la Grande-Bretagne qui devrait commencer son démantèlement vers la fin du siècle. La troisième stratégie consiste à couler du béton sur le bâtiment réacteur. C'est sans doute la plus simple et la moins coûteuse. C'est celle qui nous semble la meilleure.



Figure 3. Stratégies de démantèlement possible.

Une centrale nucléaire moyenne produit jusqu'à 10 000 m³ de déchets radioactifs dont la majeure partie est de très faible radioactivité (béton et autres matériaux). Ceux de fortes radioactivités, principalement le combustible utilisé et le cœur du réacteur, doivent être évacués, traités et stockés dans des sites adaptés. La majeure partie des autres parties du réacteur sont de faible ou très faible activité.

Le principe du démantèlement choisi aujourd'hui en France est de ramener le site à son état initial que les spécialistes qualifient de « retour à l'herbe ». L'objectif du déclassement et démantèlement est de libérer partiellement ou totalement le site nucléaire sur lequel se trouve le réacteur pour le dédier éventuellement à d'autres usages. Ce travail se décompose en trois étapes principales :

1. Le combustible utilisé est retiré pour être entreposé ou retraité. Les différents circuits sont vidangés, les systèmes d'exploitation déconnectés et les ouvertures vers l'extérieur sont condamnées et scellées.

2. Les opérations de décontamination de la surface des bâtiments et du matériel sont menées à bien. Les équipements d'exploitation sont démontés, recyclés ou provisoirement entreposés, selon leur activité radiologique.
3. Tout ce qui reste de l'installation est démantelé et le site est libéré pour d'autres utilisations.

Plus de la moitié des coûts de démantèlement correspond aux structures de l'enceinte en béton du réacteur et de l'intérieur de cette enceinte. L'objectif est de découper en moyenne plus de 10,000 m³ de matériaux de radioactivité très variable, mais souvent faible, pour les enterrer ailleurs sous quelques dizaines de mètres de remblais ; le chantier peut durer des dizaines d'années avec des risques d'irradiation possibles pour les personnels réalisant le démantèlement. Dans tous les cas il est nécessaire d'avoir un suivi radiologique rigoureux pendant tout le temps que dure le démantèlement. De plus, les déchets, qu'ils soient radiologiquement très actifs ou non, nécessitent un transport hors du site et un lieu d'entreposage ou de stockage. Il ne faut pas non plus sous-estimer les nouveaux déchets et effluents générés lors des opérations de démantèlement et de transport ainsi que les particules fines qui peuvent s'échapper lors des opérations de sciage ou meulage.

Plusieurs domaines de compétences sont nécessaires pour assurer convenablement un démantèlement conventionnel. Il faut être capable de cartographier l'installation dans ses moindres détails, de maîtriser la chimie des résidus, de mettre en œuvre des mesures de radioprotection des travailleurs. Il faut aussi être capable de développer des robots capables d'opérer en milieu radioactif. Parmi les tâches à effectuer lors du démantèlement conventionnel, il faut caractériser chaque déchet, les trier et réduire au maximum leur volume. Les principaux inconvénients du démantèlement classique sont indiqués dans la figure 4.

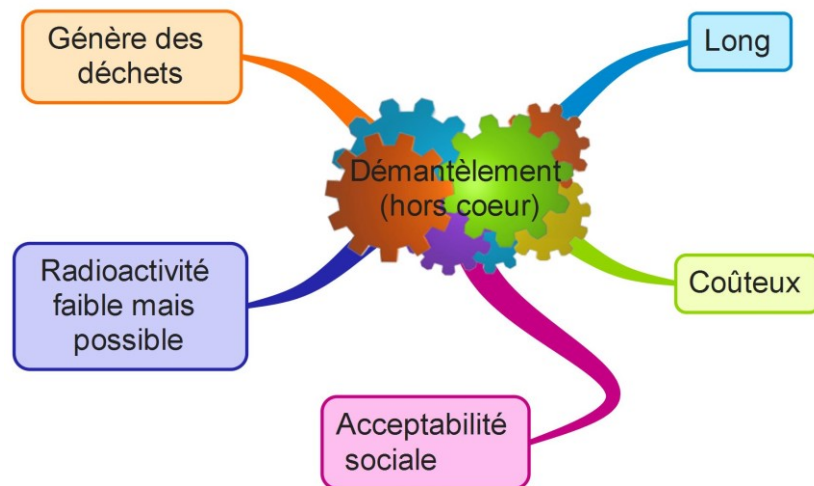


Figure 4. Principaux inconvénients du démantèlement classique.

Le démantèlement *in situ*

Le démantèlement *in situ* est une alternative au démantèlement conventionnel moins coûteuse et plus rapide à mettre en œuvre¹⁰. Le schéma serait le suivant après avoir retiré les éléments les plus radioactifs :

- Remplir de béton tout ou partie de l'intérieur de l'enceinte (ce peut être fait sans risque avec un béton fluide).
- Remblayer 10 mètres au-dessus de cette enceinte, soit une colline de 60 m au-dessus du terrain naturel, d'une emprise totale de 10 hectares, moins importante que des terrils du Nord.
- Engazonner et arborer la zone remblayée.

Tous ces travaux sont simples et peuvent être réalisés en deux ans. Cette solution permet de gagner 60 % à 80 % du coût de démantèlement, voire plus. Elle évite toutes les maintenances complexes et fastidieuses. Le site nucléaire restant sur place, les conséquences économiques de l'arrêt de la centrale sont moindres pour les communes locales puisque l'opérateur d'électricité ou l'état pourraient verser un « loyer » pour conserver le site nucléaire.

Les radiations extérieures résiduelles seront faibles. Elles seront arrêtées par le béton et la couverture végétale. Ceci n'empêchera pas l'accès à la colline sur laquelle on pourra installer d'autres systèmes énergétiques comme des panneaux solaires, par exemple. Au pire, on dissuaderait éventuellement l'accès à ce site boisé de 10 hectares au lieu d'interdire pendant 10 ou 20 ans l'accès d'un chantier de surface supérieure. Tout risque pour la nappe phréatique peut être évité.

La solution de démantèlement décrite ci-dessus est une alternative intéressante au démantèlement traditionnel car son coût est bien inférieur et son exécution beaucoup plus rapide. En particulier :

- Elle diminue fortement les manipulations en zone active puisque les matériaux activés restent sur le site et seront noyés dans le béton. Leur faible radioactivité n'induera pas de dégagement de chaleur notable dans le béton. La dose radiologique prise par les personnels assurant le démantèlement sera donc négligeable.
- Il n'y a pas besoin de transporter des matériaux, même faiblement actifs, sur les sites de stockage qui peuvent être situés à une grande distance du réacteur en démantèlement puisque ceux-ci restent sur le site. Il n'y a notamment pas besoin d'avoir recours à un site de stockage extérieur ce qui simplifie fortement le problème de rechercher et de faire accepter celui-ci à la population locale.
- Le coût d'une telle opération de démantèlement est bien inférieur aux procédures classiques puisque tout se fait sur place sans avoir à manipuler une grande quantité de matière, même faiblement radioactive. La colline engazonnée sur le site du réacteur démantelé peut être utilisée puisqu'il n'y a aucune radioactivité notable issue du sous-sol (le combustible irradié ayant bien entendu été enlevé avant l'opération de démantèle-

¹⁰ Voir <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/demantelement-des-centrales-nucleaires-pourrait-on-faire-simple-6883/>

ment et géré ailleurs). En effet, tout rayonnement est arrêté par le béton qui a été coulé dans l'enceinte du réacteur.

- La commune sur laquelle est situé le réacteur continue à percevoir des taxes dont le montant est à définir puisque c'est elle qui héberge le réacteur démantelé.

La figure 5 résume les avantages du démantèlement *in situ*.

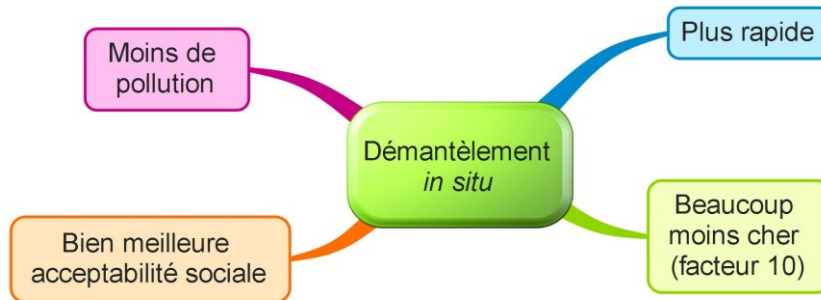


Figure 5. Quelques avantages du démantèlement "in situ"

En deux mots

Il est incompréhensible que la solution du démantèlement *in situ* ne soit pas étudiée sérieusement car elle est simple et peu coûteuse. Il n'y a pas besoin de réduire en morceaux les installations constituées d'éléments faiblement ou très faiblement radioactifs en générant par ces opérations poussières et désagréments divers. Il n'y a pas non plus besoin de trouver un site pour disposer les déchets de faible radioactivité avec l'opposition qui existera certainement d'une partie de la population locale. Le démantèlement *in situ* est une opération rapide et peu coûteuse à mettre en œuvre. Elle permet de rapidement réaliser le démantèlement d'une centrale. Les économies réalisées, de l'ordre de 30 à 40 milliards d'euros, pourraient être utilisées à d'autres fins plus utiles à la société.

Les difficultés techniques, économiques et médiatiques du démantèlement peuvent conduire EDF à reporter celui-ci de plusieurs décennies tout en provisionnant dans son bilan des montants très élevés et discutables. Une étude et une démonstration rapide de la solution proposée ci-dessus auraient beaucoup d'avantages, y compris celui d'améliorer le bilan financier d'EDF.

18. Les réacteurs nucléaires doivent-ils être souterrains ?

La réalisation en souterrain des réacteurs mondiaux aurait minimisé l'impact de l'accident de Tchernobyl et permit ainsi la poursuite des grands investissements nucléaires après 1990. L'accident de Fukushima aurait été évité, ou d'impact très réduit, et l'énergie nucléaire fournirait une grande partie de l'électricité mondiale à un coût attractif. Le choix de réacteurs en surface paraissait justifié il y a quarante ans car on estimait que la probabilité d'accident grave était très faible. De plus, les ouvrages souterrains de grand volume étaient alors loin de leur utilisation courante actuelle. Il est néanmoins regrettable que l'option souterraine n'ait pas été étudiée¹¹ il y a vingt ans en France car l'industrie nucléaire française serait aujourd'hui dans une meilleure situation.

On accepte maintenant un surcoût très important pour les réacteurs de 3^{ème} génération tels que l'EPR pour réduire la probabilité d'accident grave. Néanmoins, il existe des solutions moins chères pour aboutir au même résultat. Une solution plus attractive, réduisant la probabilité et surtout l'impact d'un accident serait la réalisation en souterrain des réacteurs français de 2^{ème} génération de 900 ou 1,300 MW en ajoutant quelques améliorations mineures. La faisabilité et le coût de cette option sont évalués ci-dessous. La réalisation de réacteurs souterrains permettrait de réduire les coûts d'installation puisque le sous-sol fournirait naturellement des éléments de sûreté supplémentaires par rapport à ceux qui existent déjà dans les réacteurs de deuxième génération. En les laissant en surface, on augmente les coûts de la sûreté comme on peut le constater avec l'EPR.

Faisabilité

On peut mettre en souterrain toute la partie nucléaire, piscine comprise. Une couverture rocheuse d'une centaine de mètres est suffisante et peut être adaptée à la qualité du rocher : la partie classique (turbine, alternateur et transformateurs) peut rester en surface ou être en souterrain mais séparée de la partie nucléaire.

Le volume disponible en souterrain pour la partie nucléaire peut être supérieur au volume disponible en surface dans une enceinte de protection circulaire. Cela correspond aux usines hydroélectriques souterraines actuellement largement développées dans le monde. Les volumes nécessaires par MW sont du même ordre pour l'hydroélectricité. Des dizaines d'usines hydroélectriques souterraines auront d'ici 2050 des puissances et des volumes souterrains supérieurs à ceux d'un réacteur nucléaire.

Les éléments nucléaires d'une centrale de surface sont répartis dans une enceinte circulaire de confinement d'une cinquantaine de mètres de diamètre, soit 2 000 à 3 000 m² et d'une

¹¹ L'essentiel de ces commentaires sur la réalisation des réacteurs souterrains est dû à Pierre Duffaut, géologue à EDF et ancien président du comité français de mécanique des roches : 50 ans d'expérience en géologie et ouvrages souterrains, des centrales d'EDF aux mines, aux stockages pétroliers et à l'urbanisme souterrain. Voir <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-centrales-nucleaires-futures-seront-elles-souterraines-10155/>.

cinquantaine de mètres de hauteur. La forme en plan préférable en souterrain est rectangulaire, d'une largeur de 25 m pour bénéficier de solutions standardisées s'appliquant dans les roches usuelles, et d'une longueur pouvant facilement atteindre 200 m ; des élargissements locaux importants sont faciles à réaliser si nécessaire. Une hauteur de 50 m est usuelle. Les éléments du réacteur peuvent être les mêmes qu'en surface mais disposée différemment.

Un avantage de la forme rectangulaire, largement utilisée en hydroélectricité, est l'utilisation de ponts roulants de grande capacité facilitant les pré-assemblages, la rapidité du montage et le gros entretien.

La plus grande centrale hydroélectrique souterraine, au Canada, a une puissance de 6 GW. Elle est opérationnelle depuis 20 ans. Elle a une puissance de 6 GW, c'est-à-dire quatre fois celle d'un EPR et 4 fois le volume souterrain correspondant.

La meilleure preuve de faisabilité est la réalisation en souterrain du réacteur franco-belge de Chooz qui est un REP de 300 MW électriques. Il a fourni très régulièrement 40 TWh entre 1960 et 1980. Le volume souterrain pour toute la partie nucléaire était de 100,000 m³, soit 330 m³par MW.

Sécurité

La construction du réacteur expérimental de Lucens, en Suisse, a commencé en 1962. C'était un réacteur à eau lourde refroidi au dioxyde de carbone (CO₂) de 30 MW de puissance thermique permettant de générer une puissance électrique de 6 MW. Il était installé dans une caverne de 25 mètres de haut et de 20 mètres de diamètre (figure 1).

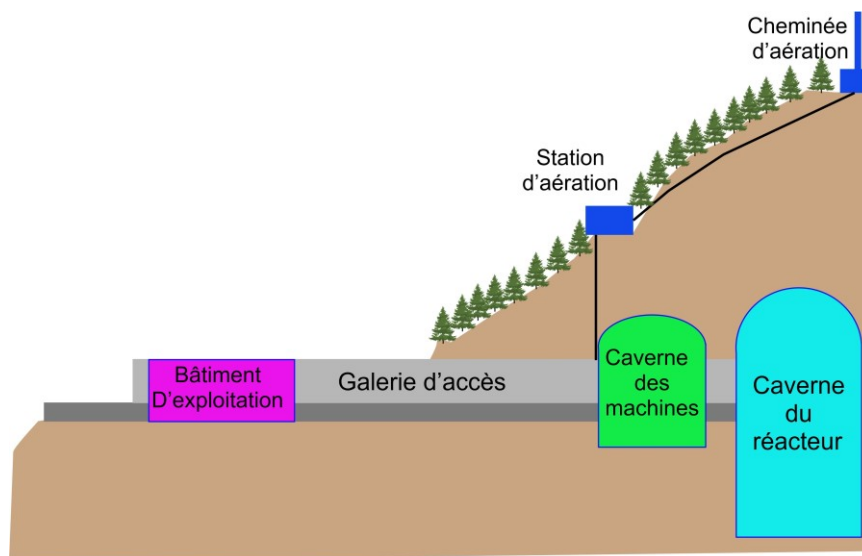


Figure 1. Schéma de l'implantation de la centrale nucléaire de Lucens. <http://www.ensi.ch/fr/themes/centrale-nucleaire-lucens/>.

Un accident grave avec début de fusion du cœur suite à un problème de refroidissement s'est produit en 1969 lors d'un démarrage. Cet évènement est peu connu car la sécurité, due à sa réalisation en souterrain, a été efficace évitant tout impact extérieur important, la conséquence essentielle étant la perte du réacteur. Il n'y a eu aucun impact radiologique sur la population ou le personnel et la radioactivité à l'extérieur est restée au niveau de la radioactivité naturelle. Il a été facile d'isoler le réacteur et de le noyer sous le béton pour le démanteler.

Bien que ce soit dans un autre domaine, on peut aussi rappeler les nombreuses explosions militaires nucléaires souterraines, de très grande énergie, qui sont restées parfaitement confinées alors que les explosions aériennes ont fortement pollué l'atmosphère en produits radioactifs.

Le coût global des accidents de Tchernobyl et Fukushima est du même ordre de grandeur que le coût global de construction des 500 réacteurs existants. Pour la France, le coût d'un accident majeur a été officiellement évalué à cinq cents milliards d'euros. Dans le cas d'un réacteur souterrain, ce coût serait beaucoup plus faible, principalement celui du réacteur, et au maximum le dixième du coût d'un accident extérieur en évitant tout grave impact régional ou national.

L'industrie nucléaire évalue que le passage à l'EPR divise par 10 la probabilité du risque d'accident de la 2^{ème} génération. Le passage en souterrain en réduit fortement l'impact et quelques améliorations peu coûteuses des réacteurs de 2^{ème} génération peuvent en réduire aussi la probabilité.

L'intérêt majeur du souterrain est d'éviter la possibilité d'un risque catastrophique à l'échelle nationale et au-delà. L'implantation en souterrain des piscines stockant les barres irradiées est aussi un gain de sécurité très important. Les barres d'uranium peuvent rester en souterrain aussi longtemps que souhaitable.

Coût

La réalisation du volume souterrain et de son revêtement demande 3 ans : c'est maintenant une opération classique de génie civil dont le coût et le délai sont bien définis avec peu d'aléas. Le montage des éléments nucléaires en est totalement indépendant et bénéficiera de ponts roulants efficaces et d'accès larges par galerie ou puits rebouchés à la mise en service. Les accès en service, de section très réduite, seront obturables très rapidement en cas d'alerte ou d'accident.

Le volume souterrain par MW sera inférieur à 500 m³, d'un coût unitaire inférieur à 1 000 €/m³. Soit un coût très inférieur à 500 000 euros par MW (le coût des usines souterraines hydroélectriques est d'ailleurs très inférieur à ce chiffre). En admettant 8 % par an pour amortissement et frais financiers pour 7 000 heures annuelles de production, le coût correspondant par MWh est de $(500 \times 1\,000 \times 0,08) / 7\,000 = 5,70$ €. Ce surcoût est très inférieur au surcoût d'un EPR de surface par rapport aux centrales existantes.

Le délai global d'exécution peut être réduit de 1 ou 2 ans. Les coûts de montage avec pont roulant ne devraient pas dépasser les coûts de montage en surface. On sait d'expérience, que le coût d'exploitation en souterrain des centrales hydroélectriques ne diffère pas du coût en surface.

Pour le démantèlement, on peut utiliser la technologie proposée dans le chapitre précédent ce que rend son coût très faible et permet même de rendre le terrain à son état initial.

Le point important est que le coût global par MWh est probablement très inférieur au coût d'un EPR, ce qui est un élément économique essentiel dans la compétition énergétique.

Perspectives de réalisation en France

La réalisation en souterrain de centrales de 2^{ème} génération bien maîtrisées et économiquement compétitives est sans doute une option plus économique et plus acceptable que la

construction en surface de nouvelles solutions. De plus, la construction de réacteurs en bordure de fleuve qui vient d'être officiellement abandonnée en Chine, sera peut-être difficile en France si elle n'est pas souterraine. Toutefois, il est préférable de construire une centrale en bord de mer où le problème de manque d'eau ou de réduction de son débit pour le refroidissement ne se pose pas. De nombreuses implantations sont envisageables, notamment près de centrales actuelles en conservant services et lignes électriques (par exemple dans le granite de Flamanville ou la craie de Penly). Une construction en série entre 2025 et 2050 serait une solution plus judicieuse du point de vue économique pour remplacer une partie des centrales existantes, après l'augmentation de leur durée de vie, que celle de construire des réacteurs de 3^{ème} génération dont les premières réalisations montrent qu'on ne maîtrise pas très bien ni les coûts ni les délais.

Les réacteurs à neutrons rapides

La France est l'un des pays les mieux placés pour développer des réacteurs à neutrons rapides. La réalisation du prototype Astrid continue la voie ouverte avec Phénix et Superphénix. L'option souterraine est aussi d'actualité pour ce type de réacteur. Ceci en réduirait le coût puisque le fait d'être enterré est déjà un dispositif de sécurité en cas d'accident grave. La France aurait tout intérêt à développer cette option pour se placer sur le marché mondial des réacteurs à neutrons rapides.

Perspectives à l'exportation

Diverses options sont envisageables dans le domaine du nucléaire face à une forte compétition internationale:

- 1- L'EPR mais il est handicapé par les retards actuels, par le manque de références d'exploitation et par le coût. Pour satisfaire à des demandes en sécurité de plus en plus drastiques, des solutions souvent complexes et coûteuses ont été adoptées grévant la compétitivité de ce type de technologie.
- 2- D'autres solutions basées sur une 3^{ème} génération améliorée, éventuellement en association avec d'autres pays sont possibles. Un tel déploiement se fera certainement en Asie.
- 3- Des réacteurs de 3^{ème} génération mais de plus faible puissance, typiquement de l'ordre de 300 MW électriques, sont aussi intéressants. En effet, bien que le prix du kWh soit environ le double de celui des réacteurs français actuels, ils sont compétitifs par rapport à l'EPR dont les coûts ont explosé. De plus, cette taille de réacteur peut se contenter d'un réseau électrique moins puissant ce qui présente un intérêt pour de nombreux pays en développement. On peut imaginer de tels réacteurs sur une barge ou enfouis sous l'eau lorsque le pays a une ouverture sur la mer. Ce type de réacteur peut être complètement pris en charge par le constructeur si bien que le pays qui l'accueille n'achète que de l'électricité mais ne s'occupe pas de la construction, de l'installation, de la maintenance et du démantèlement.
- 4- La réalisation et la mise sur le marché international de surgénérateurs une fois le prototype Astrid réalisé et validé au niveau industriel. Toutefois, cela demandera environ une vingtaine d'années compte tenu des contraintes externes pour un tel développement en France. La réalisation de réacteurs à neutrons rapides pourrait être plus rapide dans d'autres pays qui pourront attaquer plus tôt le marché mondial du nucléaire.

Quelle que soit la solution ci-dessus (3^{ème} génération améliorée ou réacteurs à neutrons rapides), la réalisation de réacteurs nucléaires en souterrain apporte des avantages en termes de coût et de sécurité.

Il existe aussi une solution peu chère rapportée au kWh produit en développant des réacteurs de 2^{ème} génération améliorés et souterrains. Comme il s'agit d'une génération de réacteurs largement exploitée en France, notre pays a les meilleures références mondiales correspondantes et la formation des exploitants peut se faire dans les centrales françaises identiques existantes. Propositions et succès peuvent être rapides avec de faibles aléas financiers.

En deux mots

Réaliser des réacteurs nucléaires en souterrain est une technologie présentant de nombreux avantages. Cela permettrait de diminuer les coûts, notamment ceux liés à la sûreté puisque le sous-sol peut servir de confinement en cas d'accident grave, même si la probabilité de celui-ci est faible. Les progrès réalisés dans le domaine de l'hydraulique rendent cette technologie possible avec un minimum d'aléas. La France devrait considérer sérieusement cette possibilité et agir avant l'arrivée d'offres similaires de la part de compétiteurs chinois, russes ou coréens. Les spécialistes asiatiques du souterrain s'intéressent sérieusement à cette option et l'expertise chinoise du souterrain, faible il y a vingt ans, est maintenant tout à fait valable (la 3^{ème} centrale hydroélectrique des Trois Gorges vient d'être réalisée en souterrain et produit 3 GW). De plus, l'option de démantèlement proposée dans le chapitre précédent devient plus simple diminuant ainsi encore le prix de l'électricité produite.

19. Accidents nucléaires : le risque zéro n'existe pas

Quelle que soit l'activité, le risque zéro n'existe pas. Un accident est toujours possible même si, comme dans le cas de l'énergie nucléaire, sa probabilité est faible quand les procédures sont respectées. En matière de risques, l'objectif dans l'industrie nucléaire est :

- De réduire au maximum la probabilité qu'il y ait un accident
- Dans le cas où celui-ci arrive, de réduire au maximum l'impact qu'il peut avoir sur les populations et l'environnement.

L'échelle INES

L'industrie nucléaire est particulièrement surveillée. Le plus petit incident est répertorié ce qui permet d'avoir un retour d'expérience et d'améliorer le référentiel de sûreté. La gravité des incidents est classée selon l'échelle INES (International Nuclear Event Scale) qui comporte 8 niveaux allant de 0 (le moins grave) à 7 (le plus grave). Cette échelle est explicitée dans la figure 1.

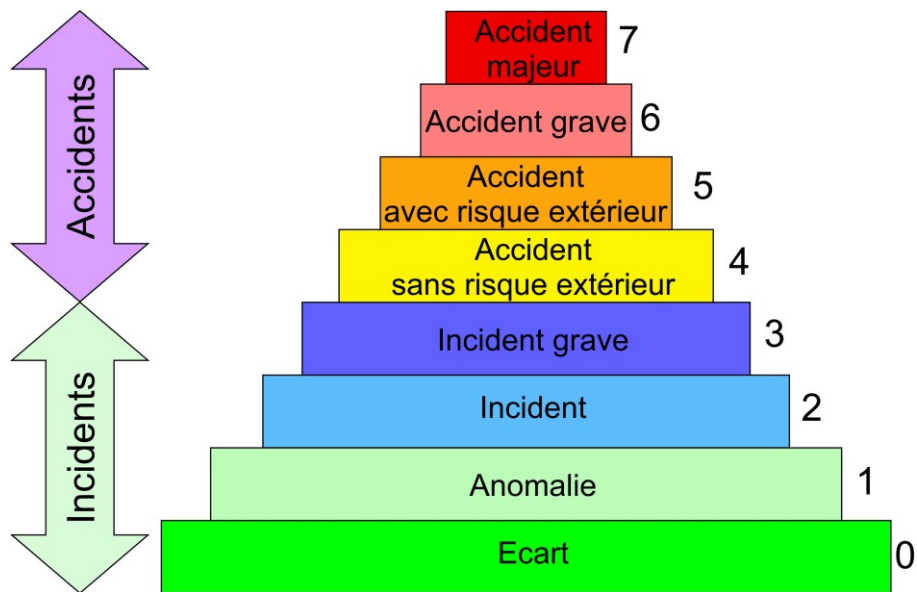


Figure 1. Échelle INES (International Nuclear Event Scale)

Les événements allant de 0 à 4 sur cette échelle sont des incidents qui n'ont aucun impact à l'extérieur du site. Ceux allant de 5 à 7 sont des accidents avec un impact sur le site. Le tableau 1 illustre, sur quelques exemples, chacun des niveaux de l'échelle INES. Dans tous les cas il y eut une ou plusieurs défaillances humaines. On serait tenté de dire qu'il faudrait retirer au maximum l'intervention de l'homme dans la conduite d'une installation qu'elle soit nucléaire ou pas. C'est sans doute une mauvaise solution car si l'on trouve très souvent une défaillance humaine dans un accident industriel, on ne comptabilise pas les cas où une intervention humaine a permis d'éviter un accident. Or ces cas sont certainement beaucoup plus

nombreux que les premiers. Ce qui est important c'est que le personnel responsable d'une installation nucléaire ait une profonde culture de la sûreté et qu'il tienne compte des retours d'expérience d'incidents s'étant produit dans l'installation ou dans des installations similaires. Il faut aussi que les installations sensibles soient suivies et contrôlées par une autorité indépendante qui tienne toutefois en compte les critères économiques pour ne pas imposer des contraintes dont le bénéfice est faible pour un coût élevé.

Niveau	Exemple
7	Tchernobyl (Ukraine, 1986), Fukushima Daiichi (Japon, 2011)
6	Kyshtym (Russie, 1957). Explosion d'une cuve de déchets de haute activité dans une usine de retraitement et rejets importants dans l'environnement
5	Three Mile Island (USA, 1979), Windscale (Royaume-Uni, 1957)
4	Tokaimura (Japon, 1999). Surexposition mortelle de travailleurs suite à un évènement de criticité dans une installation nucléaire.
3	Ikitelli (Turquie, 1999). Perte d'une source de ⁶⁰ Co de haute activité
2	Atucha (Argentine, 2005). Surexposition au-delà de la limite annuelle autorisée d'un travailleur d'une centrale nucléaire
1	Vol d'un densimètre
0	Anomalie n'ayant aucune importance au niveau de la sûreté

Tableau 4. Illustration, sur quelques exemples, d'incidents ou d'accidents pour les différents degrés de l'échelle INES.

Accidents nucléaires

La figure 2 indique les accidents nucléaires de niveaux 4, 5, 6 et 7 de l'échelle INES qui sont survenus dans l'industrie nucléaire civile. Certains concernent des réacteurs nucléaires produisant de l'électricité (Tchernobyl, Fukushima, Three Mile Island, Saint-Laurent-Des-Eaux et Bohunice). Les trois premiers seront brièvement développés ci-dessous. D'autres sont relatifs à des réacteurs de recherche (Chalk River, Lucens), à des usines de retraitement ou de préparation de combustible (Kyshtym, Windscale, Tōkai-Mura) ou lié au domaine médical (Goiania, Fleurus). L'accident de Kyshtym, en URSS, survenu en 1957 dans le complexe militaro-industriel de Mayak n'a été révélé qu'en 1976 par un transfuge soviétique. Avec les moyens de détection actuels, un tel accident serait immédiatement détecté.

Ces accidents ne couvrent que le domaine civil. Il y a eu aussi des accidents dans le domaine militaire mais ceux-ci restent souvent au niveau du secret-défense. Par exemple, en 1961, un bombardier B52 porteur de deux bombes H d'une puissance de 4 Mt (260 fois la puissance de la bombe de Hiroshima) chacune a explosé en vol en Caroline du nord aux États-Unis. Cinq des six dispositifs de sécurité n'avaient pas fonctionné mais heureusement le sixième a

empêché l'explosion. L'une des bombes a atterri avec son parachute, la seconde s'enfonça dans le sol d'un champ et l'on retrouva des débris jusqu'à sept mètres de profondeur.

L'accident de Palomares, en Espagne, est plus connu. Un B52 chargé de quatre bombes H de 70 kt et 1,5Mt a explosé après un choc avec une partie de l'avion ravitailleur. Une bombe fut retrouvée intacte, une autre tomba à la mer et deux furent détruites. Des milliers de personnes furent mobilisées pour retrouver les restes et décontaminer le sol (1 400 tonnes de terre et de végétaux légèrement contaminés furent envoyées aux États-Unis pour décontamination et stockage).

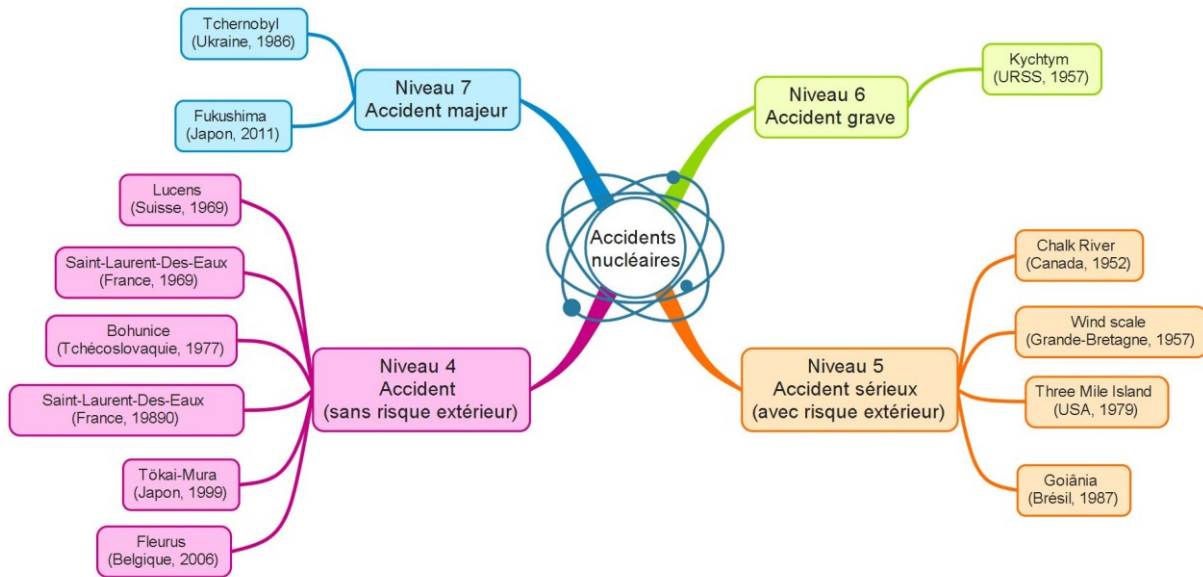


Figure 2. Accidents nucléaires civils.

L'accident de Three Mile Island (TMI), près de Harrisburg aux États-Unis, a eu lieu le 28 mars 1979. Il s'agissait d'un réacteur de type REP (réacteur à eau pressurisé) de la même technologie que celle utilisée en France. L'origine est une défaillance matérielle et des défaillances humaines mineures qui ont été amplifiées par des fausses manœuvres faites par les opérateurs qui n'avaient pas compris ce qui se passait. Il y a eu fusion de 45 % du cœur dont une partie a coulé au fond de la cuve du réacteur mais ne l'a pas percée. Les rejets vers l'extérieur ont été négligeables et cet accident a été classé au niveau 5 de l'échelle INES. Le réacteur avait été mis en service 5 ans plus tôt. Cet accident a permis des progrès majeurs en matière de sûreté qui ont été adoptés au niveau mondial.

Le 26 avril 1986, en Ukraine, il s'est produit le plus grave accident dans le domaine du nucléaire. Il s'agit d'un réacteur de type RBMK qui, pour certains niveaux de puissance, est instable par construction et ne possède pas d'enceinte de confinement. C'est une technologie différente de celle exploitée en France (REP). Il avait été mis en service 3 ans plus tôt. L'origine de l'accident est humaine car certaines sécurités avaient été court-circuitées pour réaliser un essai dans des conditions où le réacteur est instable. Une excursion incontrôlée de puissance égale à 100 à 200 fois la puissance nominale s'est produite conduisant à l'accident majeur. Les structures du réacteur ont explosé et un incendie important du graphite contenu dans le réacteur s'est déclaré. Il y a eu des rejets massifs de radioactivité dans l'atmosphère et dans l'environnement local. Ces produits radioactifs se sont propagés sur de

très grandes distances. Pour cet accident majeur, il est intéressant de comparer la quantité de plutonium rejetée dans l'atmosphère avec celle qui a été rejetée lors des essais nucléaires aériens effectués entre 1945 et 1980 (tous les essais étaient atmosphériques jusqu'en 1960). Il y a eu 543 essais atmosphériques (sur plus de 2 400 au total) qui ont dispersé environ 4,2 tonnes de plutonium dans l'atmosphère, soit 350 fois plus que ce qui a été rejeté à Tchernobyl (12 kg), ceci dans la plus grande indifférence.

À la suite d'un séisme de magnitude 8,9 sur l'échelle de Richter qui s'est produit au large du Japon, un tsunami s'est formé et a touché les côtes nord-ouest japonaises le 11 mars 2011. Les vagues, d'une dizaine de mètres de hauteur et jusqu'à 30 m à certains endroits ont ravagé près de 600 km de côte et pénétré parfois jusqu'à 10 km dans les terres. Il y a eu des dégâts considérables avec environ 18 500 morts dont 90 % décédés par noyade. Trois des quatre centrales nucléaires situées à Fukushima Daiichi ont été touchées par des vagues de 15 m conduisant à une perte de refroidissement de ces réacteurs qui étaient en fonctionnement alors que le quatrième était à l'arrêt. Ces réacteurs étaient des REB (réacteurs à eau bouillante) de technologie américaine. Il y a eu fusion partielle de certains cœurs et explosion d'hydrogène car ces réacteurs n'étaient pas équipés de recombineurs d'hydrogène. Il y a eu des rejets massifs de radioactivité mais heureusement les vents étaient favorables et ont poussé une grande partie de ces produits vers la mer. Les rejets sur terre ont été surtout locaux. Les rejets radioactifs de cet accident, classé au niveau 7 sur l'échelle INES, représentent environ 10 à 15 % de ce qui a été émis à Tchernobyl. L'accident de Fukushima résulte de plusieurs facteurs. Une réglementation non contraignante si bien qu'il n'y a pas eu de mise à niveau de la sûreté des installations alors que cela aurait dû être fait dans plusieurs secteurs, des falsifications de résultats de contrôles et d'essais, une autorité de sûreté non indépendante, sans pouvoir réel et pas très compétente, etc.

Le plus grave accident en France a eu lieu le 13 mars 1980 à Saint-Laurent-les-Bains sans aucune conséquence pour l'homme. C'était un réacteur de type graphite-gaz, filière qui avait été abandonnée au profit des REP. Il a été classé au niveau 4 dans l'échelle INES.

Perception des accidents

Les accidents ne sont pas tous perçus de la même manière. Le nucléaire fait peur et toute victime dans ce domaine prend une résonance bien supérieure à tout autre accident. Les impacts psychologiques après l'accident s'avèrent bien supérieurs car un certain nombre de personnes sont déplacées et des zones contaminées peuvent être interdites d'accès conduisant à des pertes de territoire. L'OMS estime que les conséquences les plus graves à long terme concernent la santé mentale avec une augmentation des comportements à risque, des cas de dépression et d'autres troubles neurologiques et psychologiques pouvant conduire en particulier au suicide. Des conséquences similaires ont pu résulter de très importants déplacements de population liés aux grands barrages. L'hydroélectricité a nécessité plus de cinq millions de personnes déplacées liées à la surface du réservoir.

Par contre, le nombre de décès immédiat est en général bien inférieur à ce que l'on peut observer avec d'autres sources d'énergie lors d'accidents majeurs. Ceci est illustré dans le tableau 2 tiré de la base de données de l'ENSAD (Energy-related severe accident database) qui a répertorié le nombre d'accidents dans le domaine de l'énergie ayant causé, entre 1969 et 2000, plus de 5 morts dans le monde.

Énergie	Nombre d'accidents	Nombre de morts
Charbon	1 221	25 107
Pétrole	397	20 218
Gaz naturel	135	2 043
GPL	105	3 921
Hydraulique (hors Chine)	11	29 938
Nucléaire	1	31
Total	1 870	81 258

Tableau 5. Accidents dans le domaine de l'énergie entre 1969 et 2000 qui ont causé plus de 5 morts dans le monde.

Les données sur le charbon sont sans doute sous estimées car dans les mines de certains pays il existe des travailleurs non déclarés qu'on ne comptabilise pas lors d'une catastrophe. Il y a aussi des accidents survenant dans des mines clandestines. Cependant, les exploitations à ciel ouvert sont beaucoup moins dangereuses.

En incluant la Chine, les ruptures de barrages ont causé plus de 100 000 victimes, dont 20 000 pour les barrages hydroélectriques, essentiellement au siècle dernier. Par exemple, l'accident qui a eu lieu à Morvi, en Inde en 1979, a fait environ 5 000 victimes. La France a connu deux accidents de rupture de barrages non hydroélectriques. Le premier en 1895 au Bouvet qui a fait 100 morts et le second en 1959 à Malpasset qui a fait 421 morts. La rupture d'un barrage a des conséquences dramatiques dans les régions à forte densité de population mais n'entraîne l'abandon des zones inondées que pendant une courte période.

À titre de comparaison, dans un autre domaine, les accidents de la route ont fait, en 2003, 1,2 million de morts et 50 millions de blessés pour un préjudice total de l'ordre de 400 milliards d'euros.

En deux mots

En France, l'énergie nucléaire est une industrie très surveillée par une autorité indépendante. Tous les incidents et accidents se produisant au niveau mondial sont répertoriés et servent à améliorer la sûreté qui est en constante progression. Il est important que l'industrie nucléaire soit contrôlée par une autorité indépendante, compétente et doté de pouvoir. Même si la probabilité d'accident est faible, tout doit être fait pour réduire au maximum les conséquences d'un accident en évitant un impact sur les populations et l'environnement. Dans la mesure où l'on souhaite réduire les émissions de CO₂ au niveau mondial, le nucléaire est très utile pour la production d'électricité. Son développement en Asie se poursuit, quelle que soit l'évolution de ce marché dans les pays occidentaux. Il faut donc que cela se fasse dans les meilleures conditions de sûreté possible. La réalisation des futurs réacteurs nucléaires en souterrain pourrait être un progrès majeur en sécurité, économie et acceptation par le public.

20. L'Hydroélectricité

Le rôle de l'hydroélectricité est souvent sous-estimé. Sa part dans l'énergie primaire mondiale est officiellement et arbitrairement estimée au tiers de la part du nucléaire alors qu'elle produit environ la même quantité d'électricité. Ses impacts négatifs sont soulignés, ses impacts favorables oubliés. Les Français pensent « qu'on ne construit plus de barrages » alors que la production hydroélectrique mondiale croît annuellement de plus de 100 TWh/an (la production hydroélectrique française est de 60 TWh/an).

On n'inclut généralement dans cette forme d'énergie que le potentiel des rivières en oubliant que l'énergie des marées est utilisable pour produire de l'électricité. L'Usine de la Rance en est une illustration. Elle a pendant longtemps été la plus grande usine marémotrice du monde avec une puissance de 240 MW et n'a juste été dépassée de peu récemment par la centrale de Sihwa Lake (254 MW) en Corée du Sud. Le potentiel théorique mondial des marées est équivalent à celui des cours d'eau et, en France, il lui est très supérieur. Cette ressource est analysée dans un chapitre séparé.

L'hydraulique traditionnelle

L'hydroélectricité traditionnelle est basée sur l'énergie des rivières correspondant à leur dénivellée entre la source et la mer. L'eau peut être emmagasinée derrière un barrage puis utilisée sous une charge de quelques mètres ou centaines de mètres de hauteur : 1 m³ par seconde descendant de 1 m peut produire près de 10 kW ; on génère ainsi en une heure 10 kWh en utilisant 3 600 m³ d'eau. Pour produire 1 kWh il faut donc utiliser 360 m³ descendant de 1 m mais en fait 400 m³ à cause de pertes électromécaniques ou 40 m³ sous 10 m de charge ou 1 m³ sous 400 m.

Il existe dans le monde des usines hydroélectriques produisant de l'électricité avec une plus ou moins grande dénivellée comme l'illustrent les schémas de la figure 1. Plus la dénivellée est importante moins la quantité d'eau est grande pour générer la même quantité d'électricité.

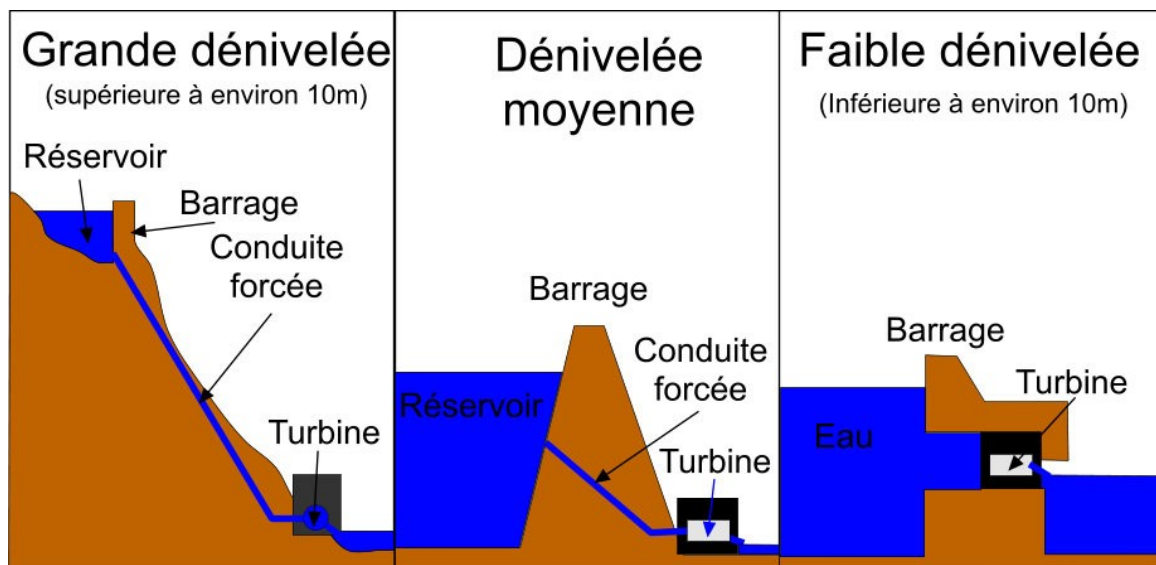


Figure 1. On peut produire de l'électricité hydraulique avec des retenues d'eau à différentes dénivelées.

L'écoulement annuel mondial des rivières est proche de 40 000 milliards de m³ (0,30 m³ en moyenne sur 130 millions de km²). Pour une dénivelée moyenne de l'ordre de 200 m, le potentiel théorique est de 0,5 kWh par m³, soit 20 000 TWh/an mondialement. Les pays industrialisés ont équipé près d'un tiers de leur potentiel théorique et on estime généralement qu'en 2050 la production hydroélectrique mondiale pourrait être de 6 000 à 8 000 TWh/an, ce qui correspond au taux actuel de croissance de la production et au tiers du potentiel. Il paraît improbable que la production puisse atteindre 10 000 TWh, ce qui représenterait la moitié du potentiel théorique.

Actuellement, plus de 80 % de l'hydroélectricité provient de centrales ayant une puissance supérieure à 50 MW. La production mondiale de 3 500 TWh/an est assurée par une capacité totale de centrales d'un peu plus de 1 000 GW. La surface totale des réservoirs est voisine de 400 000 km² et leur volume utile proche de 4 000 milliards de m³.

Avantages de l'hydroélectricité

L'hydroélectricité a cinq avantages spécifiques souvent oubliés.

- La possibilité d'adapter une grande partie de la production aux besoins et notamment aux grandes variations journalières et hebdomadaires futures liées au développement du solaire et de l'éolien.
- L'adaptation très rapide aux changements de la demande ou aux incidents du réseau électrique ; d'où un meilleur contrôle de la fréquence et une meilleure sécurité des réseaux. Elle joue donc un rôle essentiel dans le développement du smart grid.
- La possibilité de projeter ou d'adapter certains aménagements de production au pompage entre deux réservoirs : les deux tiers de la population mondiale vivent dans des régions avec 4 mois de saison de pluies et de forte production hydraulique, et 8 mois de sécheresse où l'association de l'énergie solaire et du stockage journalier par pompage sera très efficace.
- La longévité car un site peut produire normalement pendant plus d'un siècle, avec une révision de l'électromécanique tous les cinquante ans. L'ensablement de certains réservoirs peut réduire progressivement la production.
- Un faible coût par MWh de l'exploitation et de l'entretien.

L'essentiel du coût au MWh correspond à l'investissement et l'hydroélectricité, concurrencée par les centrales à combustibles fossiles, a été pénalisé longtemps par des taux d'intérêt très élevés. Les coûts actuels, très variables suivant les sites, sont beaucoup plus compétitifs.

Impacts sur l'environnement

Les aménagements hydroélectriques peuvent avoir deux impacts négatifs très sérieux : de grands déplacements de population (surtout en Chine et en Inde de 1960 à 2000) et des impacts négatifs sur l'environnement, impacts négligés ou très sous-estimés il y a cinquante ans. Beaucoup d'aménagements ont aussi des impacts favorables sur l'environnement et rendent deux services complémentaires très importants :

- Le stockage d'eau saisonnier qui a permis de nourrir des centaines de millions d'habitants grâce à l'irrigation.
- La réduction des inondations, très importante dans beaucoup de pays.

Il y a dix ou quinze ans une campagne médiatique mondiale a souligné les inconvénients de l'hydroélectricité, préconisant même un moratoire mondial sur la réalisation de barrages hydroélectriques. Elle a eu la conséquence favorable d'une meilleure prise en compte dans les projets des problèmes environnementaux. Elle a réduit les réalisations dans les pays les plus riches et les plus pauvres. Les pays industrialisés avaient déjà équipé l'essentiel des sites économiquement intéressants et l'abandon, même peu justifié, de sites restants, les a peu pénalisés. Les pays moins industrialisés mais capables de financer les projets, comme la Chine, la Turquie, l'Iran, l'Inde, le Brésil, le Vietnam, ont considéré cette campagne médiatique comme peu objective et n'ont pas ralenti leurs investissements.

Mais les investissements très utiles dans les pays les plus pauvres ont été retardés de dix ans par le gel des financements internationaux. Ceux-ci ont cependant repris efficacement depuis quelques années en tenant le plus grand compte des impacts.

Stockage d'Énergie par STEPs (Station de Transfert d'Énergie par Pompage).

L'Hydroélectricité, en complément de la production d'électricité, peut avoir un rôle important dans le stockage d'énergie électrique par pompage et turbinage entre deux lacs ou réservoirs à des niveaux différents. Le rendement est d'environ 80 %, car il y a 10 % de pertes au pompage et 10 % au turbinage. La capacité mondiale actuelle des STEPs est proche de 150 GW, soit près de 15 % de la capacité des centrales de production. Leur rôle pourrait être beaucoup plus important dans le futur pour accompagner un développement important du solaire et de l'éolien. Ce point sera analysé dans un autre chapitre.

L'hydroélectricité en France

La part de l'hydroélectricité dans la consommation électrique Française est proche de 15 %, comme c'est le cas dans le monde en moyenne. La puissance installée est de 24 GW, dont 8 au fil de l'eau. L'hydraulique fournit en moyenne 8 GW et des pointes de 15 GW sont possibles en fonction des besoins. L'intérêt de cette souplesse s'accroîtra avec le développement des énergies intermittentes. La production annuelle est d'environ 60 TWh en moyenne mais varie entre 50 et 70 TWh selon les années.

L'hydroélectricité en France a les avantages rappelés ci-dessus. Comme les réalisations ont été faites il y a plus de 40 ans, le coût est le plus faible parmi toutes les sources actuelles de production. Cela représente aujourd'hui une économie de plus de dix milliards d'euros par an par rapport à une production à base de combustibles fossiles. Ce sera probablement de plus de vingt milliards par an dans le futur par rapport à un coût moyen plus élevé. Les centrales hydroélectriques françaises existantes seront, pour la plupart, encore en service en 2100.

Les réalisations françaises ont déplacé entre 1950 et 1970 quelques milliers de personnes. Les impacts négatifs sur l'environnement sous-estimés il y a cinquante ans comme pour tous les investissements de l'époque, n'ont pas eu autant d'importance que dans d'autres pays. L'hydraulique suscite des critiques justifiées pour certaines réalisations et l'hostilité parfois systématique de défenseurs de l'environnement oubliant les impacts positifs. Le potentiel de production complémentaire réaliste est limité à quelques TWh/an et son utilisation n'est pas programmée. Le potentiel de STEPs, qui nécessitent beaucoup moins de place avec peu d'impact par GW, est beaucoup plus important et analysé par ailleurs. L'intérêt d'accroître leur capacité actuelle de 5 GW jusqu'à une vingtaine de GW est lié au développement des énergies intermittentes. 20 GW utilisant 2 000 heures par an d'électricité intermittente ex-

cédentaire permettraient, pertes déduites, de fournir au réseau 30 TWh/an au moment opportun et à un coût compétitif. Cet investissement pourrait se faire essentiellement entre 2030 et 2050 si les énergies intermittentes jouent alors un rôle essentiel.

On estime que l'utilisation des installations hydrauliques pendant un siècle au niveau mondial revient à réduire d'environ 10 % le réchauffement climatique qui sera atteint en 2050.

En deux mots

Lorsqu'il en a la possibilité, la priorité absolue d'un pays est de construire des centrales hydrauliques. Cela demande un investissement important mais une fois mises en service, ces usines hydrauliques fourniront de l'électricité peu chère, avec un coût pratiquement constant pendant toute leur durée de vie qui peut s'étendre au-delà du siècle.

En France, l'hydraulique fournissait 56 % de l'électricité du pays en 1960. Si cette proportion est descendue aux alentours de 10 % aujourd'hui c'est parce que les Français consomment beaucoup plus d'électricité et qu'il a fallu utiliser de nouveaux moyens de production car l'extension de l'hydraulique était limitée. Pour illustrer cette forte croissance, rappelons qu'en 1950 la consommation électrique de la France était de 30 TWh, soit la moitié de la production hydraulique actuelle.

21. L'énergie des marées : une chance perdue pour la France ?

Le potentiel français d'énergie marémotrice est le meilleur du monde. Moins de 1 % est utilisé.

Principe

L'amplitude des marées, principalement liée à l'attraction lunaire, varie suivant un cycle correspondant à la moitié du cycle lunaire, donc proche de 14 jours. L'amplitude et l'énergie disponible sont plus fortes une semaine sur deux mais sont tout à fait prévisibles. On se réfère généralement à l'amplitude moyenne, faible à plus de 50 km des côtes, d'importance très variable le long des côtes, plus forte en moyenne en France que dans tout autre pays.

L'intérêt énergétique des zones de forte amplitude résulte du fait que l'énergie potentielle par km^2 est proportionnelle au carré de l'amplitude H (en m). En effet, si on stocke dans des grands bassins à marée montante un volume en m^3 de $10^6 H$ par km^2 que l'on turbine quand la mer est très basse sous une charge moyenne de 0,5 H , on peut produire une énergie proportionnelle au produit $10^6 H \times 0,5 H$, c'est-à-dire proportionnel à H^2 .

On peut opérer dans les deux sens et donc 2 fois pendant chacune des 700 marées annuelles. Le volume turbiné pour $H = 5$ m correspond à une hauteur d'eau utilisée annuellement de $2 \times 700 \times 5 \text{ m} = 7.000 \text{ m}$! et un volume par km^2 de 7 milliards de m^3 . Même si le volume utilisé est plus faible et sous une charge moyenne de l'ordre de 2 m, le potentiel annuel par km^2 est supérieur à la production moyenne par km^2 de réservoirs hydroélectriques traditionnels. En effet, ceux-ci produisent mondialement 3.500 TWh pour 400.000 km^2 de lacs, soit 9 GWh/ km^2 .

Le potentiel théorique annuel de l'énergie marémotrice est, en GWh/ km^2 , proche de $2 H^2$, où H est exprimé en m, l'amplitude moyenne de la marée. L'utilisation réelle peut être de l'ordre de 40% du potentiel théorique, c'est-à-dire $0,8 H^2$ soit :

- 40 GWh/ km^2 pour $H = 7$ m
- 20 GWh/ km^2 pour $H = 5$ m
- 10 GWh/ km^2 pour $H = 3,50$ m

L'énergie marémotrice dans le monde

Les zones mondiales où l'amplitude moyenne de la marée dépasse 6 m totalisent quelques dizaines de milliers de km^2 dont 10.000 proches des utilisateurs. En utiliser la moitié correspond à une production de 200 TWh/an limitée à quelques pays. Le principe d'une usine marémotrice, celle de La Rance, est montré dans la figure 1.

Le potentiel le plus important correspond à quelques centaines de milliers de km^2 où l'amplitude de la marée est entre 3 et 6 m ; beaucoup sont proches des utilisateurs. Un potentiel réaliste de 1.000 TWh/an à 2.000 TWh/an est donc envisageable en turbinant entre la mer et des bassins fermés par des digues. Il concerne vingt pays et la majorité de la population mondiale.

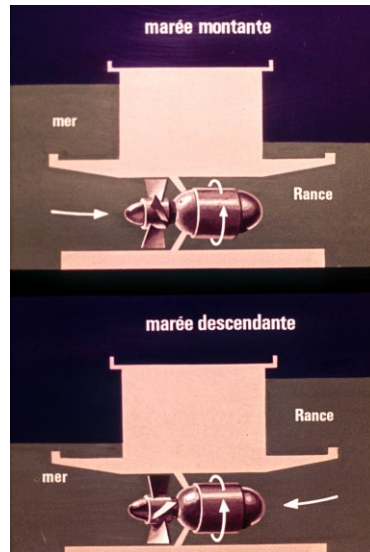


Figure 1. Principe d'une usine marémotrice. Image provenant de [wikimedia commons](#); Auteur [energy.gov](#) (Gouvernement fédéral des États-Unis).

Une autre utilisation de l'énergie des marées est l'exploitation directe des courants de marée par des hydroliennes opérant dans l'eau comme les éoliennes utilisent le vent en surface. L'eau est mille fois plus dense que l'air mais la vitesse des courants est bien inférieure à celle du vent exploité par les éoliennes. Il y a peu de zones possédant une vitesse de courant suffisante. Ces zones sont exposées aux tempêtes et le coût est élevé : le potentiel mondial réaliste correspondant est de l'ordre de 100 TWh/an. Pour illustrer la taille d'une hydrolienne, la figure 2 montre un démonstrateur de l'hydrolienne Sabella D10 déposée en mer en juin 2015.



Figure 2. Démonstrateur de l'hydrolienne Sabella D10 à Brest lors des portes ouvertes. Image provenant de [wikimedia commons](#); Auteur [Mannaerts G.](#)

L'énergie des marées est donc liée à la réalisation de bassins importants. La faisabilité est prouvée par la réalisation de grands ouvrages maritimes. L'utilisation des marées est donc liée au coût et aux impacts divers.

La très faible utilisation de l'énergie marémotrice jusqu'à maintenant est essentiellement liée à son coût, plus élevé que celui des énergies fossiles. On a estimé son coût futur à envi-

ron 100 €/MWh. Sa compétitivité dépendra du coût des autres sources d'énergie mais quatre raisons l'améliorent maintenant :

- L'augmentation du coût des autres solutions acceptables.
- Des progrès technologiques permettant notamment l'utilisation économique de marées inférieures à 6 m.
- Les possibilités d'utilisation pour d'autres usages des grands bassins créés à l'abri des tempêtes.
- La protection des rivages contre la montée des océans.

Dimensionnement

Il faut souligner l'impact des digues dans l'économie des projets. Une digue en pleine mer, en moyenne de 20 à 30 m de hauteur totale, a un coût de l'ordre de 50 à 100 millions d'euros par km. La géométrie de la côte est favorable par endroits mais une grande partie des sites sera sous forme d'un demi-cercle le long de côtes rectilignes. Pour un très grand site de 50 km de diamètre, la longueur de la digue sera proche de 75 km pour un coût de 7,5 milliards d'euros représentant annuellement 500 millions d'euros sur une durée de 15 ans. Une surface de bassin d'environ 1.000 km² permet de produire 10 TWh pour une amplitude de marée de 3,5 m à un coût de digues par MWh de $500/10 = 50$ €, ce qui est acceptable. L'énergie produite serait de 40 TWh et le coût des digues plus faible (12 €/MWh) si l'amplitude est de 7 m. Mais si le diamètre du bassin est de 5 km au lieu de 50 km la longueur de digue par MWh est multipliée par 10 et son coût n'est plus acceptable. Toutefois, pour un bassin de 10 km de diamètre et une amplitude de 7 m le coût des digues par MWh est de 60 €/MWh ce qui reste encore acceptable.

Des géométries plus favorables de la côte réduisent naturellement ces coûts au MWh mais la plus grande partie du potentiel réaliste correspond à de très grands bassins. Cela correspond à des quantités d'énergies et des montants d'investissements comparables à ceux des centrales nucléaires.

Le coût total au MWh de l'énergie marémotrice est voisin de celui des autres énergies non carbonées et peut être même inférieur pour les grands sites à forte amplitude de marées.

Impacts sur l'environnement

Le choix final sera lié aux impacts positifs ou négatifs qui dépendent des modes d'exploitation choisis.

On peut comparer par exemple trois sites de même importance produisant de l'ordre de 500 GWh/an :

- La Rance, située en France, a été réalisée il y a cinquante ans en modifiant totalement et inutilement l'écologie du bassin. La critique justifiée sur ce point est très injustement étendue à toute réalisation marémotrice. La France qui a un des meilleurs potentiels mondiaux l'étudie donc fort peu.
- Shiwah en Corée mis récemment en service. Sa construction a été décidée pour son impact favorable sur l'environnement dans le bassin.
- Le site de Swansea en Grande-Bretagne, dont le coût est en discussion, mais dont les impacts sont bien acceptés et la réalisation réclamée localement.

Les impacts d'un aménagement marémoteur sont très différents de ceux d'un barrage en rivière et généralement beaucoup plus favorables, en particulier pour les grands sites.

Il y a naturellement sous les ouvrages et à leur voisinage immédiat un impact très négatif mais il est limité à quelques pour cent de la surface des bassins.

On peut maintenir dans les bassins le régime des marées avec une faible réduction d'amplitude. On y évite les hautes mers exceptionnelles et les tempêtes. Les problèmes divers liés à l'environnement, notamment la sédimentation, sont complexes, mais il est injustifié d'admettre a priori que les impacts positifs sont inférieurs aux impacts négatifs. Les études doivent être objectives et leur importance à l'échelle des enjeux.

Les impacts socio-économiques favorables peuvent être beaucoup plus importants que pour les autres formes d'énergie. Ils peuvent augmenter fortement l'intérêt économique d'un aménagement marémoteur.

Ces ouvrages évitent deux inconvénients des grands barrages : il n'y a pas de déplacement de la population et l'impact visuel des grands aménagements est très faible, les digues étant peu visibles à 10 ou 20 km de la côte.

Le choix des sites peut éviter les lignes importantes de navigation mais les digues apportent naturellement une gêne à la navigation locale existante, gêne réduite en partie par des écluses. Toutefois, les opportunités d'aménagement de ports nouveaux en eau profonde dans les domaines du tourisme, de la pêche et de l'industrie sont importantes.

Deux impacts positifs peuvent être très importants :

- La protection du rivage, la possibilité de maîtriser le niveau d'eau à la côte et d'y réaliser des aménagements économiques, ce qui peut être essentiel dans certains pays.
- La possibilité d'utiliser mondialement 50 000 km² de bassins à l'abri des tempêtes. L'aquaculture et l'énergie éolienne offshore ont là des conditions optimales de même que des développements touristiques et industriels.

Pour beaucoup de pays les impacts économiques additionnels des sites marémoteurs peuvent doubler la valeur de la production électrique.

L'énergie marémotrice en France

Le potentiel des hydroliennes en mer ouverte est évalué officiellement à 5 ou 10 TWh/an. Quelques sites d'essai, à un coût élevé, sont subventionnés par l'État. Les espoirs d'un coût compétitif apparaissent faibles pour cette solution.

En 1980, l'étude GEDEM pour EDF avait identifié 4 grands sites de bassins marémoteurs totalisant 2 000 km² avec une amplitude moyenne de 7 m, c'est-à-dire un potentiel réaliste de 80 TWh/an. Une étude sommaire des zones où la marée est supérieure à 3,5 m et la hauteur maximale de digues d'environ 30 m conduit à un potentiel global de 150 TWh/an situé principalement sur la Manche entre Saint-Brieuc et Boulogne et 20 TWh sur l'Atlantique entre Loire et Gironde.

Ce potentiel inclut :

- Une vingtaine de sites de 0,5 à 2 TWh dont 5 à 10 pourraient être réalisés d'ici 2030.
- Une dizaine de très grands sites pouvant être réalisés de 2030 à 2050.

La réalisation de quelques sites moyens dès que possible permettrait d'optimiser les technologies à la fois pour la réalisation des grands sites français et pour l'exportation d'une expertise. En effet, dans le domaine marémoteur, **La France a le meilleur potentiel mondial et la meilleure expertise mondiale.**

En 2013, un rapport officiel a affirmé, sans aucune justification, qu'il n'y avait pas d'avenir pour l'énergie marémotrice en France ! Une étude objective et sérieuse du coût et des impacts est souhaitable et l'on devrait aboutir à une solution dont le potentiel est certainement supérieur à 20 % des besoins français d'électricité. Début 2017, un rapport officiel Anglais préconisait l'utilisation d'usines marémotrices pour produire dix pourcents de l'électricité du pays et la réalisation immédiate d'une usine un peu plus importante que celle de la Rance. Bien que le potentiel et les atouts Anglais soient inférieurs à ceux des Français, ce rapport estimait que c'était une bonne occasion pour l'Angleterre de prendre le leadership dans ce domaine compte tenu du peu d'intérêt Français.

En deux mots

La France a un potentiel important en matière d'énergie marémotrice. Elle a réalisé une usine qui pendant très longtemps a été la plus puissante du monde et a acquis une expérience incomparable. Il y a beaucoup de possibilités non seulement sur la Manche mais aussi sur la côte Atlantique et il serait raisonnable d'au moins mener des études de faisabilité approfondies. En effet, l'intérêt économique de la France est de réduire au maximum ses importations de combustibles fossiles. L'énergie marémotrice a toute sa place dans cette stratégie en contribuant de manière non négligeable au bilan énergétique national.

22. L'« Énergie Verte » est-elle renouvelable et décarbonée ?

La biomasse est fabriquée par photosynthèse. Ce mécanisme permet de stocker de l'énergie solaire à partir de gaz carbonique et d'eau grâce à la chlorophylle qui est une molécule qui, après avoir absorbé un photon en provenance du soleil, permet d'initier certaines réactions chimiques. Pour les plantes, la photosynthèse a lieu dans les feuilles. Elle produit des sucres qui sont ensuite transportés par la sève vers d'autres endroits de la plante ; parallèlement, de l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. Le processus de photosynthèse est aussi utilisé par les algues et certaines bactéries.

Les plantes produisent aussi d'autres molécules que des sucres comme des lipides qui ont un important contenu énergétique. On les trouve dans les graines et les fruits des plantes oléagineuses. En général le rendement énergétique de la photosynthèse en milieu naturel est bien inférieur au pourcent. On estime que chaque année environ 100 milliards de tonnes de carbone sont produites par photosynthèse dont un peu plus de la moitié correspond à la végétation terrestre.

Quelques données

Pour ce qui concerne la biomasse-énergie, une tonne de biomasse sèche (matière sèche) a en moyenne un contenu énergétique de 0,43 tep. La production de biomasse par hectare dépend fortement des lieux et conditions climatiques¹². Elle est nulle dans les déserts mais peut atteindre environ 20 tonnes de matière sèche à l'hectare dans des régions tropicales humides, soit environ 8,5 tep.

La canne à sucre a un rendement de l'ordre de 3,5 tep/ha. Comme on valorise la bagasse, un sous-produit de celle-ci, pour fabriquer de l'éthanol, ce pays peut produire du bioéthanol à un coût particulièrement compétitif.

En France, la production moyenne de biomasse est entre 1,3 et 1,7 tep/ha/an. Elle est faible pour le colza et le tournesol conduisant au biodiesel (environ 1 tep/ha/an), meilleure pour les céréales (blé, maïs) avec 1,5 à 2 tep/ha/an et très bonne pour la betterave dans des sols fertiles et bien pourvus en eau où le rendement est de l'ordre de 3,5 à 4 tep/ha/an. Toutefois, pour être durable, la culture de la betterave doit être faite en alternance avec d'autres cultures.

La figure 1 donne, pour quelques cultures, la fourchette de rendement en tep/ha.

¹² Voir par exemple La biomasse, énergie d'avenir ? de H.Bichat et P.Mathis, éditions Quæ, 2013 ou Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives, C.Acket et J.Vaillant, éditions TECHNIP, 2011

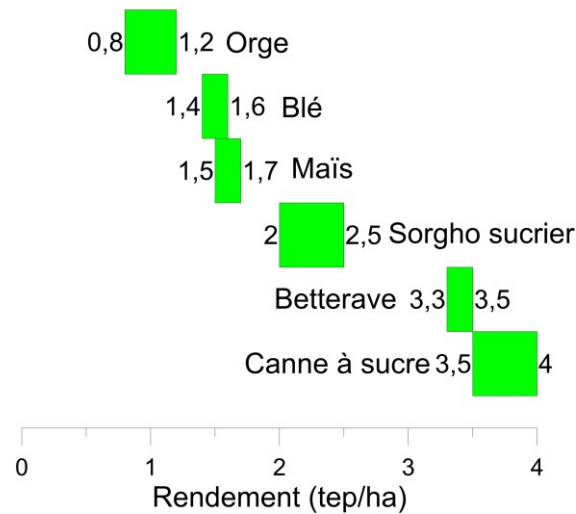


Figure 1. Rendements énergétiques de quelques cultures. Données de D.Ballerini, *Les Biocarburants*, Technip, 2006

L'énergie de la biomasse, souvent associée à la notion d'**énergie verte**, est médiatiquement séduisante, soutenue par les écologistes et beaucoup moins critiquée que les autres sources d'énergie. D'après l'Agence Internationale pour l'Énergie, elle représente 10 % de l'énergie primaire mondiale. Sa part dans ce qu'on appelle usuellement l'énergie finale est de 13 % mais sa contribution est très différente pour l'OCDE (5 %) et hors OCDE (20 %). On l'utilise principalement dans l'OCDE pour le chauffage et, en Afrique et Asie, pour la cuisson des aliments. Son utilisation pour la production d'électricité est faible et limitée aux pays de l'OCDE. Son application pour les carburants des transports est limitée par la surface des terrains à cultiver nécessaires. Un avantage est le stockage dans le combustible lui-même.

Les terres cultivables

La répartition des surfaces disponibles sur la planète selon leur nature est donnée dans la figure 2 pour le monde et dans la figure 3 pour la France.

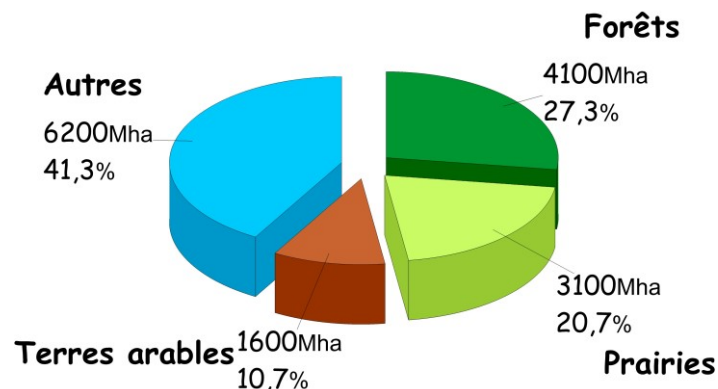


Figure 2. Répartition de la surface disponible sur terre entre différents types d'utilisation. Source : J.Bonal et P.Rossetti, *Énergies alternatives*, Omniscience, 2011

La surface totale dans le monde est de 15 000 millions d'hectares. La fraction de terres utilisables pour des cultures est de 59 %.

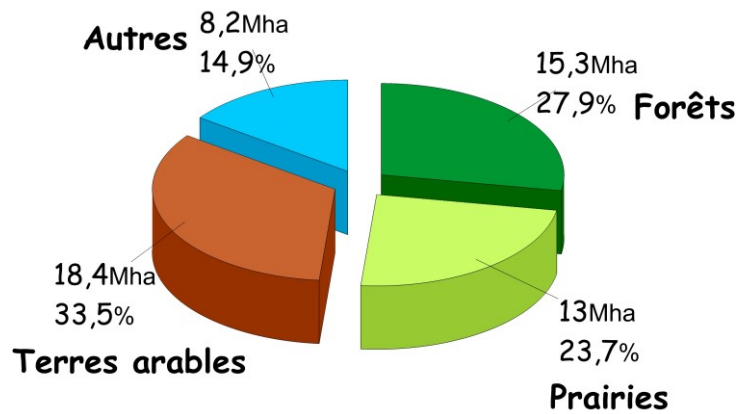


Figure 3. Répartition de la surface disponible en France entre différents types d'utilisation. Source : J.Bonal et P.Rossetti, *Énergies alternatives*, Omniscience, 2011

La surface totale de la France métropolitaine est de 54,9 millions d'hectares. La fraction de terres utilisables pour des cultures est de 85 %, c'est-à-dire mieux que la moyenne mondiale.

Les chiffres officiels sont-ils représentatifs ?

Ce qu'on appelle à tort « énergie finale » comprend pour la biomasse toute l'énergie contenue dans le bois dont une grande partie est perdue ; cette perte peut dépasser 90 % pour la consommation usuelle en Asie et en Afrique, et de l'ordre de 50 % pour le chauffage dans les pays de l'OCDE. Les évaluations sur l'utilisation réelle sont difficiles, mais la part de la biomasse dans l'énergie réellement utilisée est probablement plus proche de 5 % que de 10 % ; elle est donc proche de la part de l'hydroélectricité alors qu'elle apparaît cinq fois plus importante d'après les critères officiels d'énergie primaire ou d'énergie finale.

Est-ce une énergie renouvelable ? Est-ce une énergie décarbonée ?

Le principe généralement admis est que le CO₂ émis en brûlant la biomasse est compensé par le CO₂ absorbé par la végétation. En fait il n'y a pas d'équivalence exacte en valeur ni dans le temps.

De toute façon, il n'y a pas nécessairement de relation directe entre combustion et plantation. Et le CO₂ émis par la combustion d'un arbre n'est compensé que bien des années après, en plus ou moins, par l'absorption de CO₂ par un arbre replanté. Le CO₂ émis pour exploiter et transporter les biomasses n'est pas compensé.

On peut aussi étendre les zones de forêt sans brûler d'arbres.

L'utilisation de biomasse comme carburant pour les transports est limitée et plutôt décevante ; une deuxième génération, utilisant la biomasse cellulosique, est en cours de développement. Une troisième génération, encore à l'état de la recherche serait basée sur les microalgues. Les rendements pourraient être un ordre de grandeur supérieur à ceux de la biomasse terrestre (figure 4).

L'emploi de biomasse pour la cogénération dans les pays nordiques est très intéressant mais limité à 100 millions de personnes. L'emploi de bois pour la cuisson des aliments en Afrique et Asie, pour 1 à 2 milliards d'habitants, est une catastrophe ; il serait bien meilleur pour le

climat d'y utiliser des réchauds à pétrole pour faire cuire les aliments plutôt que d'utiliser du bois.

Enfin la combustion du bois présente de sérieux risques pour la santé, aussi bien en Europe qu'en Afrique ou Asie. Le risque de la biomasse est supérieur au risque nucléaire. Et l'utilisation du chauffage au bois peut être parfois interdite.

La part réelle de la biomasse dans l'énergie mondiale future semble devoir être très inférieure à 10 %, sauf progrès majeur dans les carburants pour véhicules.

Il paraît de toute façon souhaitable de mieux préciser le rôle réel de la biomasse, son potentiel, les usages à encourager et les impacts négatifs à éviter.

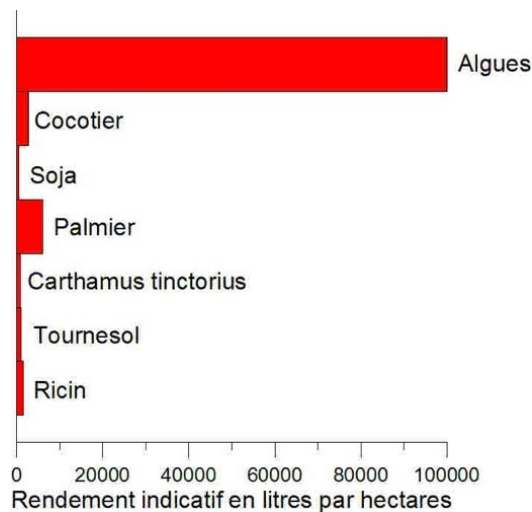


Figure 4. Rendement indicatif de quelques cultures comparé à celui des microalgues

En deux mots

L'énergie de la biomasse n'est pas que partiellement renouvelable et décarbonée. Son utilisation actuelle et potentielle semble surestimée, les inconvénients généralement oubliés. Si l'on songe à l'utiliser pour les transports, il faudra choisir entre manger et rouler un peu.

23. Pourquoi stocker l'énergie ?

On stocke ce que l'on a en trop pour pouvoir l'utiliser plus tard lorsque l'on en aura besoin. Dès les premières civilisations sédentaires, les agriculteurs ont stocké l'excès de grain qu'ils récoltaient en été pour satisfaire leurs besoins en hiver. Il en est de même pour l'énergie qui est indispensable aux êtres humains pour vivre et se développer économiquement. La nourriture n'est d'ailleurs qu'une forme particulière d'énergie qui leur est indispensable.

Sources et vecteurs énergétiques

Les besoins énergétiques sont aujourd'hui satisfaits soit par des sources d'énergie (pétrole, charbon, gaz naturel...) soit par des vecteurs énergétiques. Un vecteur énergétique permet de transporter de l'énergie d'un point à un autre. C'est le cas de l'électricité qui est de plus en plus utilisée dans les civilisations modernes, c'est aussi le cas d'un réseau de chaleur. Même si un vecteur énergétique peut fournir de l'énergie à un utilisateur, il faut une source d'énergie pour le produire.

Ce que l'on qualifie habituellement de source d'énergie sont des substances ou systèmes qui possèdent intrinsèquement de l'énergie utilisable ; celle-ci diminuant au fur et à mesure qu'on la consomme. C'est le cas de l'essence qui est dans le réservoir d'une voiture : on ne la consomme que si la voiture fonctionne. Certaines sources d'énergie sont intermittentes : c'est le cas du rayonnement solaire qu'on utilise pour fabriquer de l'électricité avec un panneau photovoltaïque ; on ne produit de l'électricité que lorsqu'il y a du soleil.

Ce qui différencie l'homme moderne de ses ancêtres lointains est qu'il souhaite avoir de l'énergie quand il en a besoin et où il en a besoin. Ceci impose une contrainte forte aux systèmes énergétiques car nos besoins d'aujourd'hui sont bien supérieurs à ceux de nos ancêtres (un français consomme aujourd'hui presque 15 fois plus qu'un français il y a deux siècles et la population de la France a doublé).

Le stockage intrinsèque

Le moyen le plus simple de stocker de l'énergie est de disposer d'une source qui fasse aussi office de moyen de stockage. C'est le cas des combustibles fossiles et du bois. La quantité d'énergie dont on peut disposer dépend de la quantité de combustible que l'on peut stocker. Cela peut être, comme en France, de quelques mois pour le pétrole. Pour l'uranium, utilisé pour faire fonctionner les réacteurs nucléaires, on a en France des stocks sur le sol national pour des années, voire des décennies.

Pour une source d'énergie que l'on importe, il faut disposer de stocks suffisants pour tenir le temps nécessaire à résoudre une crise d'approvisionnement des ressources : c'est le cas de l'uranium mais reste juste pour les combustibles fossiles.

Stocker l'électricité

L'électricité est un vecteur énergétique de plus en plus utilisé. Il est si commode qu'il serait difficile d'imaginer une civilisation moderne sans cette commodité. La particularité de ce vecteur énergétique est que la production doit être, à chaque instant, égale à la consommation. Techniquement on sait stocker de l'électricité, sous une forme ou sous une autre, mais

ce n'est pas toujours chose facile ; c'est souvent très cher et le rendement n'est pas toujours très bon. Il y a plusieurs avantages à stocker l'électricité (figure 1) :

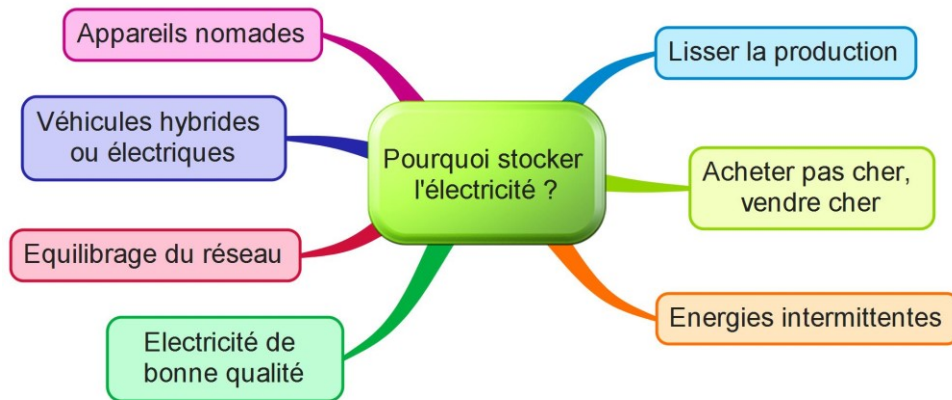


Figure 1. Il y a plusieurs raisons de vouloir stocker l'électricité.

- Pour lisser la production. En effet la demande varie fortement en fonction de l'heure, du jour, de la saison... La figure 2 montre le profil de production-consommation d'électricité le 26 janvier 2015. La plupart des moyens de production ne sont pas assez flexibles pour suivre rapidement l'évolution de la demande. Pour satisfaire le consommateur à tout instant, le producteur est obligé de surdimensionner les moyens de production et notamment d'avoir des centrales à flamme brûlant des combustibles fossiles. Ces centrales ont l'avantage de pouvoir être modulées rapidement pour fournir de l'électricité en pointe. En France, la puissance moyenne utilisée est de l'ordre de 65 GW alors que la puissance installée est proche de 120 GW car il faut pouvoir satisfaire la demande même pendant les jours les plus froids de l'année. Stocker l'électricité excédentaire produite aux heures creuses permet d'utiliser celle-ci aux heures de pointe.

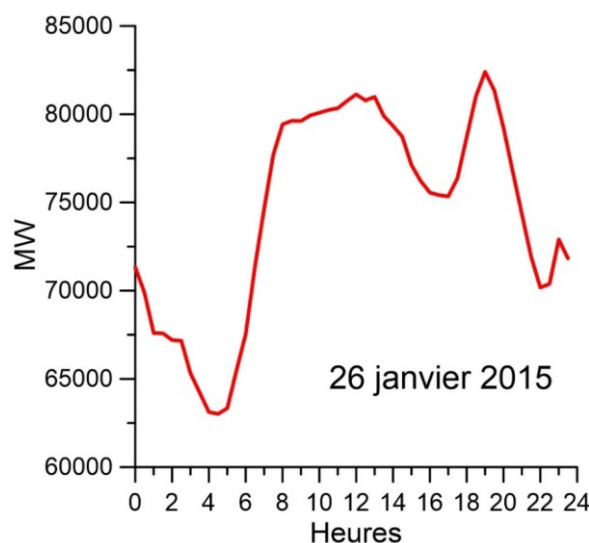


Figure 2. Consommation d'électricité sur 24 heures pour un jour typique. Source RTE

- Il est aussi intéressant de stocker l'électricité en l'achetant à bas prix aux heures creuses pour la revendre cher aux heures de pointe. Ainsi, une partie de l'électricité éolienne produite au Danemark est achetée à bas prix par la Suède et la Norvège car elle est produite à des heures où la demande est faible. Ces pays la stockent sous forme d'eau en altitude. Ils turbinent ensuite cette eau pour produire de l'électricité aux heures de pointe lorsque la demande au Danemark est forte et le prix élevé.
- Le stockage de l'électricité est indispensable pour les énergies intermittentes comme l'éolien ou le solaire si l'on veut développer ces sources d'énergie à grande échelle. En effet, une éolienne ne fournit de l'électricité que quand il y a du vent. Il faut que celui-ci ait une vitesse suffisante pour que la production soit importante car la puissance varie comme le cube de la vitesse du vent (doubler la vitesse du vent multiplie la puissance délivrée par l'éolienne par un facteur 8). Si le vent est trop fort, il faut l'arrêter sinon elle pourrait subir des dégâts irrémédiables. Une éolienne ne fournit dans l'année que 20 à 30 % de ce qu'elle pourrait produire si elle fonctionnait de manière continue à la puissance installée (cela dépend bien sûr du lieu où elle se trouve ; parfois cela peut être moins que cela, dans d'autres cas cela peut être plus¹³). Un développement massif des énergies renouvelables intermittentes ne pourra se faire sans développer des moyens de stockage, ou augmenter notablement le nombre de centrales utilisant des combustibles fossiles, donc fortement émetteurs de CO₂.
- Le stockage de l'électricité est indispensable pour les systèmes nomades (lecteurs MP3, téléphones portables, smartphones, ordinateurs portables, tablettes, etc.). La batterie reste pour ces appareils le point faible et il est difficile d'obtenir une autonomie qui satisfasse complètement l'utilisateur tout en gardant un poids et un volume acceptable.
- Le stockage de l'électricité peut enfin être utile pour fournir à l'utilisateur de l'électricité d'excellente qualité pour des besoins spécifiques. On peut aussi prévoir des moyens de stockage pour remédier à des défaillances du réseau électrique.

Stocker la chaleur

La chaleur est une part importante de la consommation d'énergie. Comme pour l'électricité, il est intéressant de la stocker lorsque l'on en a trop, ou lorsque l'on dispose d'une source d'énergie qui peut, dans certaines périodes de temps, la produire à bas coûts, pour l'utiliser quand on a besoin. Pour le particulier, il est intéressant de produire et stocker de la chaleur lorsque l'électricité est moins chère (la nuit lorsque l'on dispose de tarifs intéressants) pour l'utiliser tout au long de la journée suivante. C'est de cette manière que sont utilisés les cumulus ou ballons d'eau chaude sanitaire.

En France, on a besoin d'eau chaude sanitaire toute l'année et des besoins importants en chauffage l'hiver. Si l'on utilise l'énergie solaire thermique, par exemple, celle-ci est importante en été mais faible en hiver. Le stockage intersaisonnier serait une possibilité mais demande de grands volumes de stockage et, dans l'état actuel de la technologie, reste cher.

Le stockage thermique est aussi nécessaire pour exploiter le solaire thermique à concentration, technique qui consiste à transformer la chaleur en électricité, puisqu'il n'y a pas de so-

¹³ En Allemagne, par exemple, ce rendement n'est que d'environ 15%, valeur mesurée sur une décennie. Ainsi, les 62 GW d'éolien installés en Allemagne produisent 74 TWh/an. À titre de comparaison, les 63 GW électriques de nucléaire installés en France produisent 405 TWh/an.

leil la nuit. En stockant l'excédent de chaleur on peut ainsi continuer à fournir de l'électricité dans la soirée et pendant la nuit.

En deux mots

La consommation électrique est en croissance au niveau mondial. Cette croissance est supérieure à celle de la consommation d'énergie. Toutefois, un réseau électrique ne peut fonctionner que si la demande équilibre l'offre à tout instant. Stocker l'électricité permet de mieux utiliser les moyens de production électrique. Il est même particulièrement utile dans le cas des énergies renouvelables intermittentes pour suppléer au manque de vent ou de soleil. Bien qu'il existe un grand nombre de techniques de stockage de l'électricité, ce secteur reste encore le point de la filière électrique à optimiser. Cela peut être compensé par l'appoint de centrales thermiques qui ont l'inconvénient, surtout pour celles fonctionnant au charbon, d'être très polluantes. Dans tous les cas elles émettent du CO₂.

Avec les cumulus, le stockage de la chaleur à court terme est relativement bien maîtrisé. Toutefois, l'introduction de la RT 2012 (Réglementation Thermique 2012) dans le bâtiment a pour conséquence de faire disparaître ce moyen de stockage dans les logements neufs au profit du gaz naturel qui émet du CO₂ en brûlant. Le stockage intersaisonnier n'est malheureusement pas encore applicable facilement car il faut de gros volumes de stockage.

Le stockage de l'énergie est le point faible du domaine énergétique. C'est un secteur stratégique. Toute révolution dans ce domaine pourrait changer complètement le paysage énergétique.

24. Comment stocker l'électricité ?

Si l'on exclut les sources d'énergie qui sont un stockage intrinsèque, comme le pétrole par exemple, le stockage de l'énergie s'intéresse aux moyens permettant de stocker l'électricité ou la chaleur.

Le moyen de stockage peut générer plus tard de l'électricité ou répondre en différé à un usage (figure 1). Ainsi, si l'on stocke l'électricité sous forme électrochimique dans une batterie, on peut récupérer de l'électricité en se branchant aux bornes de la batterie. C'est aussi le cas lorsque l'on utilise l'électricité pour remonter de l'eau dans un barrage. Lorsque l'on turbine celle-ci, on génère de l'électricité. On peut aussi transformer celle-ci en une autre forme d'énergie qui sera alors directement utilisée. Ainsi, si l'on a besoin d'eau chaude sanitaire, on peut chauffer de l'eau aux heures creuses et utiliser celle-ci le lendemain en journée.

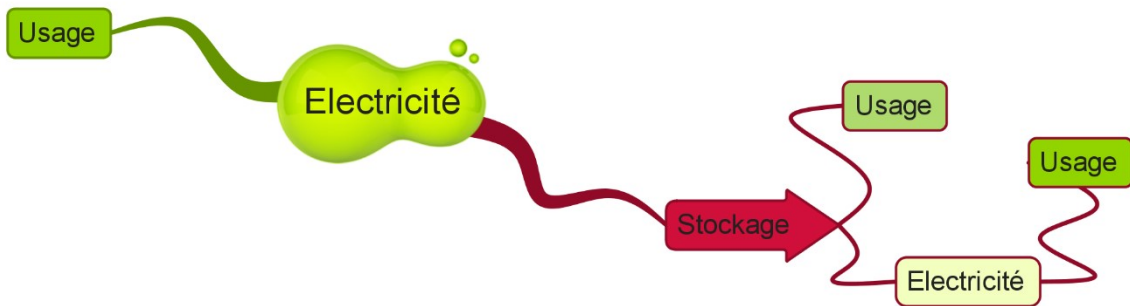


Figure 1. On peut utiliser immédiatement l'électricité ou la stocker pour l'utiliser ultérieurement directement (exemple : batterie) ou indirectement (exemple : cumulus).

Le stockage décentralisé

Il existe aujourd'hui deux moyens importants de stockage décentralisé de l'énergie en France :

- Le réservoir des véhicules stocke de l'énergie. Supposons, pour faire une évaluation simple, que les 30 millions de voitures individuelles françaises contiennent en moyenne 25 litres de carburant dans leur réservoir. Cela fait, à un instant donné, une énergie stockée de 7,5 TWh, soit environ la production d'électricité annuelle d'un réacteur nucléaire ou une semaine de consommation électrique.
- Les cumulus, qui équiperont 11 millions de foyers stockent, dans l'année, environ 20 TWh de chaleur. Ils consomment de l'électricité aux heures creuses pour chauffer de l'eau qui sera utilisée notamment aux heures de pointe. Ce moyen de stockage, pourtant très utile, risque d'être mis en péril dans les logements en construction avec la nouvelle réglementation thermique (RT2012) qui favorise l'utilisation du gaz naturel pour le chauffage par rapport à l'électricité. Cette orientation va conduire à augmenter les émissions de CO₂ des logements neufs en France par rapport à une utilisation de l'électricité.

Dans le futur, les batteries des véhicules électriques ou hybrides rechargeables stockeront aussi une grande quantité d'électricité mais ce secteur n'en est encore qu'aux balbutiements.

Stocker : pas si simple

Le tableau 1 compare différentes solutions de stockage d'une quantité d'énergie de 1 kWh. Le pétrole est une source d'énergie très concentrée mais il faut un système complexe pour générer de l'électricité comme un groupe électrogène, par exemple. Le stockage électrochimique par batteries est lourd et encombrant mais il reste très compact comparé au stockage hydraulique utilisé à grande échelle par EDF pour stocker l'électricité produite aux heures creuses.

Matériau	1 kWh
Essence	0,07 kg (70g)
Batterie Pb	30 kg
Batterie Li-Ion	5-8 kg
Eau	3 600 kg d'eau à une hauteur de 100m

Tableau 6. Comparaison de quelques moyens de stockage permettant de stocker 1 kWh d'énergie.

On peut schématiquement distinguer 3 grandes catégories de besoins de stockage : les appareils nomades, la mobilité (véhicules électriques ou hybrides) et le stockage à grande échelle pour le réseau électrique (figure 2).

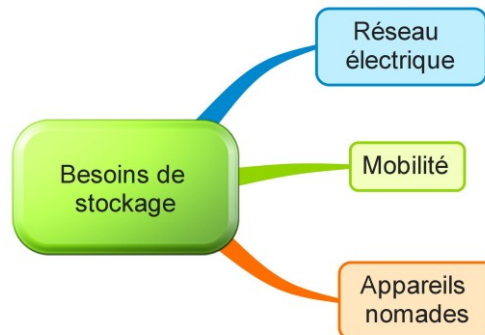


Figure 2. Différents besoins de stockage de l'électricité.

Les systèmes de stockage électrique stationnaires permettent de stocker des quantités d'électricité importantes, supérieures à quelques MWh, avec un bon rendement tout en étant capable de fournir des puissances importantes, de la centaine de MW au gigawatt. Ils servent à stocker l'excédent d'électricité disponible sur le réseau. C'est le cas des STEPs (Stations de Transfert d'Énergie par Pompes). Il y a environ 350 STEPs dans le monde et leur puissance totale est autour de 140 GW. Elles permettent de moduler environ 6 % de la puissance électrique moyenne et représentent 15 % de la puissance hydroélectrique mondiale.

Les systèmes de stockage embarqué sont utilisés pour alimenter les systèmes mobiles comme les véhicules et tous les objets nomades que l'on utilise de plus en plus aujourd'hui : smartphones, lecteurs audio ou vidéo, etc. Pour ce type de stockage le poids et/ou l'encombrement sont des paramètres importants.

Les différentes technologies

Pour stocker l'électricité, on transforme cette énergie en une autre forme. Celle-ci sera par la suite utilisée pour produire à nouveau de l'électricité ou pour d'autres usages. La figure 4 montre les différentes formes d'énergie qui peuvent être mises en œuvre pour stocker l'électricité. Ces formes peuvent être de l'énergie mécanique, chimique, thermique ou, s'il s'agit de petites quantités, électrique.

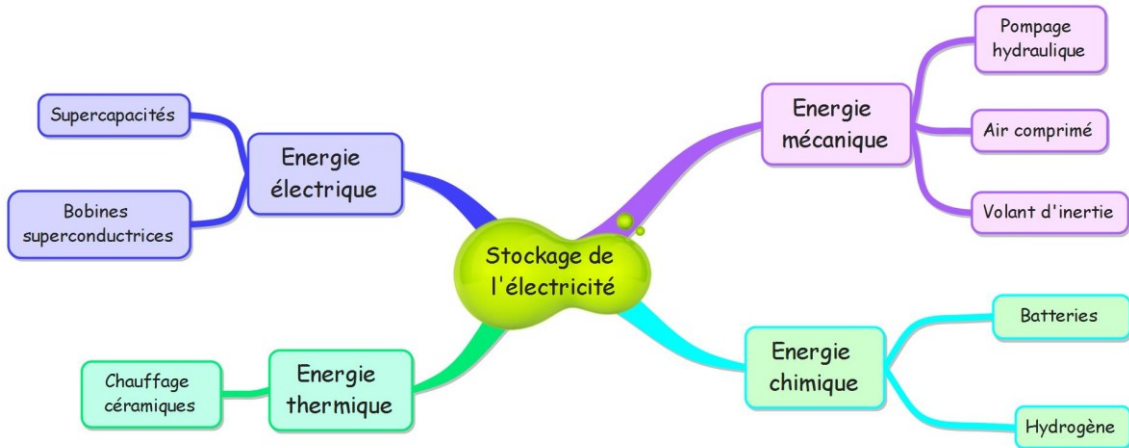


Figure 3. L'électricité peut être stockée sous différentes formes. Les technologies utilisées sont aussi indiquées.

La figure 4 place de manière schématique quelques moyens de stockage de l'électricité dans le plan énergie stockée-temps de décharge. Ces moyens se regroupent en trois domaines. Celui en haut à droite correspond aux moyens de stockage massifs de l'électricité associés au réseau électrique. Celui en bas à droite regroupe les technologies de stockage fournissant une bonne électricité de très bonne qualité et permet d'ajuster finement l'équilibre entre l'offre et la demande du réseau électrique. Le paquet en haut à gauche contient les batteries qui ont des applications dans de nombreux domaines (systèmes nomades, véhicules hybrides et électriques, réseau, etc.).

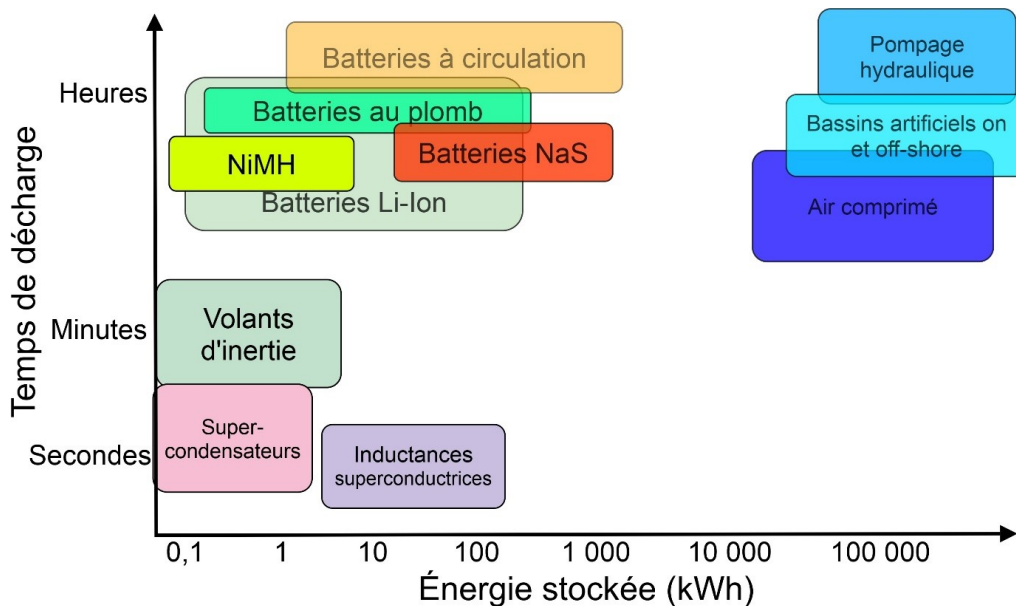


Figure 4. Quelques moyens de stockage en fonction de la quantité d'énergie stockée et du temps de décharge.

En deux mots

Le stockage de l'électricité est un domaine stratégique essentiel de la filière énergétique. C'est un secteur qui se développe de plus en plus, notamment dans le domaine des batteries qui ont de multiples applications. Dans ce secteur, les principaux objectifs sont d'augmenter la quantité d'énergie stockée par unité de volume, d'accroître le nombre de cycles possibles et de diminuer les coûts. De nouvelles technologies sont possibles comme les batteries Na-ion ou Li-air. Pour le Na-ion, l'avantage du sodium est d'être moins rare dans la croûte terrestre (23,6 g/kg en moyenne) que le lithium (20 mg/kg). Pour les batteries Li-air, qui sont au stade de la recherche, l'intérêt est d'avoir une grande densité d'énergie. En pratique, on pourrait espérer atteindre des autonomies permettant à un véhicule de couvrir environ 500 km sans recharge. Ce serait un atout indéniable pour les véhicules électriques.

25. Stocker l'énergie électrique en mer !

Le stockage d'énergie électrique n'est pas indispensable pour un fort développement des énergies intermittentes mais il est utile et peut être rentable si la part d'énergies intermittentes dans le mix électrique devient majoritaire. Pour une puissance qui est en moyenne en France de 50 GW et rarement supérieure à 75 GW, il n'est pas cependant justifié de stocker plus de 20 ou 30 GW. Les longues absences de production intermittente sont rares et peuvent être compensées par l'énergie hydraulique ou thermique ; il n'est donc pas économique de stocker plus d'une vingtaine d'heures. L'énergie à stocker est donc de l'ordre de $25 \times 20 = 500$ GWh.

Les STEPs traditionnelles

Le meilleur moyen de stocker cette quantité d'énergie est le pompage entre deux lacs (STEP). La surface moyenne de lacs pour fournir une puissance d'un GW pour les STEPs de France et du monde est de 5 km². Cette surface par GW correspond à un remplissage du réservoir en moins d'une journée ; elle est très différente de la surface moyenne de 300 km²/GW des réservoirs des barrages usuels de production dont le remplissage se fait en semaines ou en mois. La confusion entre ces deux types de réservoirs est une cause de désinformation très importante sur le stockage d'énergie.

Les STEPs françaises existantes totalisent 5 GW et utilisent 30 km². Elles sont situées dans la moitié sud, plus montagneuse, où cette capacité pourrait être au moins doublée : on peut notamment y transformer en STEPs quelques pour cent des barrages de production qui stockent actuellement 10 TWh, c'est-à-dire l'équivalent de 50 GW pendant 200 heures !

Les STEPs marines

Il est souhaitable d'équiper aussi une dizaine de GW la moitié nord de la France, qui consomme plus de la moitié de l'électricité. Le relief n'y favorise pas les STEPs traditionnelles mais les falaises du Pays de Caux et de Bretagne, 100 m au-dessus de la mer, ont de nombreux sites pouvant utiliser la mer comme bassin bas, comme le site de Okinawa au Japon présenté en figure 1. Un réservoir de 20 m de profondeur stocke 20 millions de m³ par km². 1 m³ utilisé sous 100 m de charge a une énergie de 0,25 kWh, d'où $20 \times 0,25 = 5$ millions de kWh ou 5 GWh/km². Une STEP marine de 1 GW utilisée vingt heures stocke 20 GWh et nécessite donc un bassin de 4 km², à peu près la même surface qu'une STEP de montagne.



Figure 1. STEP marine d'Okinawa au Japon

Les STEPs fluviales

Beaucoup de grands lacs hydroélectriques mondiaux existants sur des grands fleuves peuvent être adaptés au stockage d'énergie avec de très grande capacité. De nombreux sites nouveaux peuvent être dédiés au stockage. En France, l'adaptation possible de sites hydroélectriques existants concerne essentiellement les STEPs de montagne.

Une autre solution, qui ne noie aucune habitation, est basée sur quelques sites de 2 à 5 GW constitués par un bassin de 10 à 20 km² accolé à la falaise. Quelques sites possibles sont indiqués dans la figure 2. Le principe en est représenté dans la figure 3. La digue de 50 à 100 m de hauteur nécessaire a un profil très classique de barrage en enrochement très utilisé actuellement dans le monde jusqu'à 200 m de hauteur ; les matériaux peuvent provenir, très économiquement, de la portion de falaise noyée dans le bassin, la digue ayant ainsi la couleur de la falaise. En se basant sur des coûts unitaires connus, l'investissement total par kW est de 1 500 € comparable à celui des STEPs classiques de montagne.

La capacité électrique importante de ces STEPs incite à les placer près des centrales nucléaires de Paluel ou de Penly, dont les lignes électriques ont des capacités semblables.

La réalisation de STEPs n'est intéressante que progressivement, entre 2030 et 2060, et coïncide avec la fin d'utilisation des réacteurs actuels. Une solution surprenante mais réaliste et économique consisterait à noyer dans 30 ans les sites nucléaires actuels de Paluel et Penly dans un bassin de STEP marine de 5 km de diamètre pour 5 GW. La vue de digues réalisées par des matériaux de la couleur de la falaise remplacerait la vue actuelle des centrales nucléaires.

On peut aussi réaliser dans les Landes en bord de mer, sur un terrain à la cote +20, un bassin de 5 km de diamètre et 50 m de hauteur pour une capacité de 2 GW. La zone est inhabitée. Le site est à 30 km de la centrale nucléaire du Blayais et de sa ligne électrique.

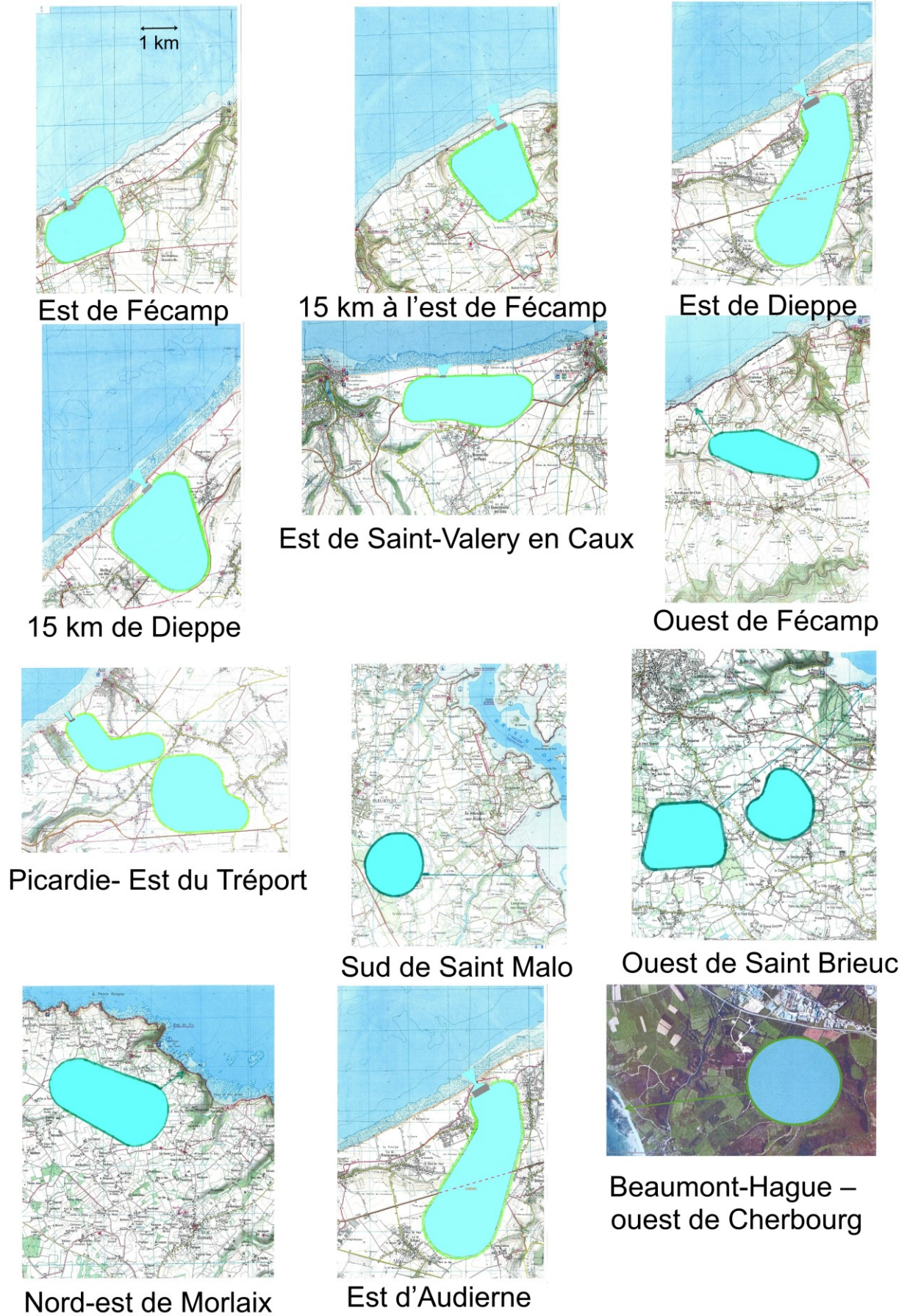


Figure 2. Quelques sites potentiels pour une STEP marine

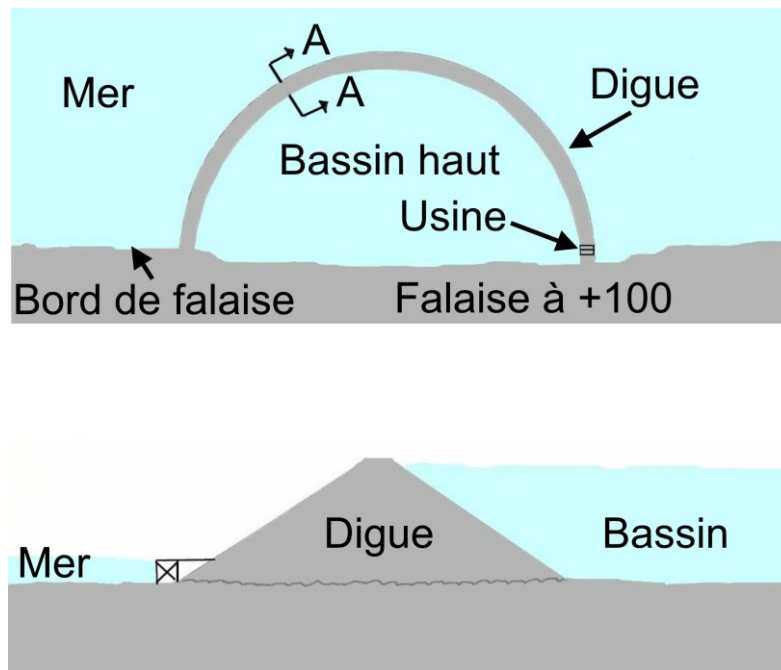


Figure 3. Principe d'une STEP marine

En deux mots

Réaliser en STEP marines la moitié des STEP souhaitables en France est donc très réaliste. Les STEP marines ont l'avantage de juxtaposer les 2 bassins et de permettre ainsi une adaptation très rapide de la puissance alors que les tunnels reliant les 2 lacs d'une STEP classique nécessitent un temps d'adaptation important.

Il y a une grande flexibilité dans le choix des STEP marines selon les conditions environnementales. Cela peut être un bassin artificiel s'appuyant à la côte et séparé de la mer par une digue comme il est indiqué dans les figures 3 et 4.

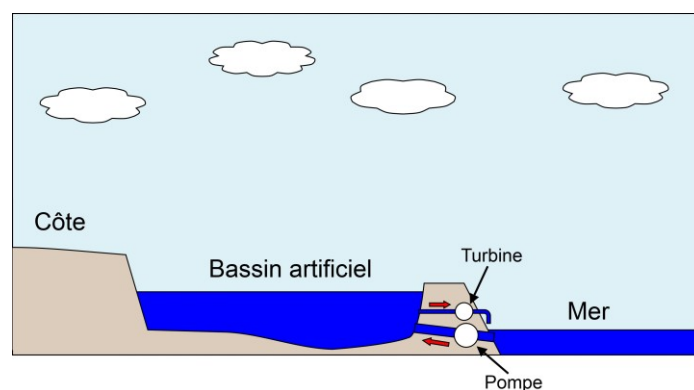


Figure 4. STEP marine appuyée à la côte

Cela peut aussi être un lac artificiel en position haute couplé à la mer qui joue le rôle de réservoir bas (figure 5).

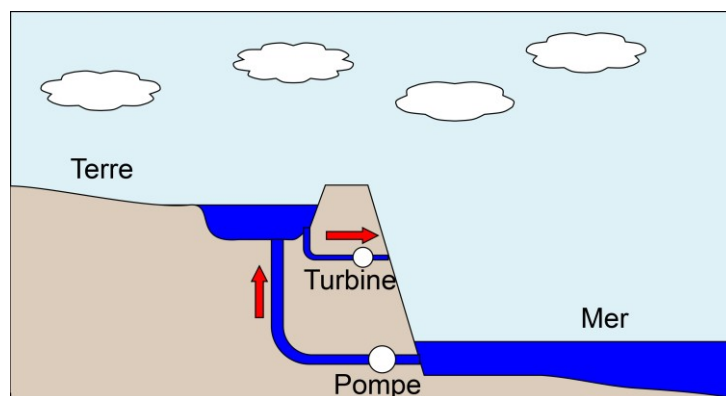


Figure 5. STEP marine utilisant la mer comme réservoir bas et un lac artificiel comme réservoir haut.

Une autre possibilité est de créer un atoll artificiel en mer comme indiqué dans la figure 6.

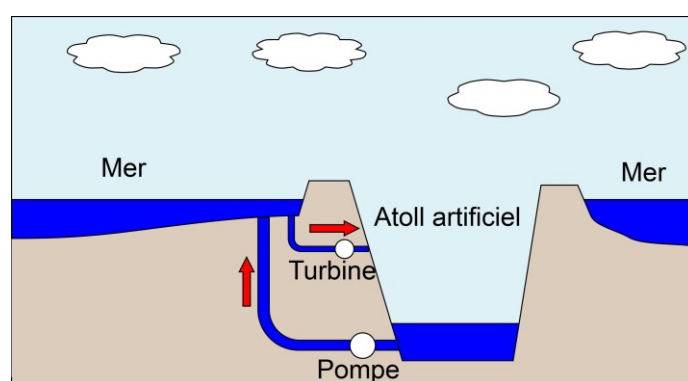


Figure 6. STEP marine basée sur un atoll artificiel.

26. Énergies intermittentes et stockage d'énergie

« Utopie » ou « Solution miracle », les énergies éolienne et solaire ont deux atouts spécifiques : un potentiel global très supérieur aux besoins de l'humanité et la possibilité d'un développement industriel rapide dans tous les pays même si une partie de la technologie et de l'équipement est importée. Leur coût, beaucoup trop élevé il y a dix ans, devient compétitif, et les critiques diverses liées à l'environnement freinent peu leur développement mondial. Elles ont par contre un inconvénient : l'intermittence de la production électrique. En effet, il faut un vent suffisant mais pas trop fort pour qu'une éolienne produise de l'électricité et il faut du soleil pour qu'un panneau photovoltaïque en fournisse lui aussi.

Le souhait général est une utilisation majeure d'énergies non fossiles sans pour autant sacrifier au confort auquel les gens sont habitués. Le problème principal est d'adapter le mix électrique d'un pays ou d'une région à l'intermittence de certaines sources d'énergie, les autres, comme l'hydraulique ou le nucléaire, n'ayant pas cette particularité.

On analyse ici comme exemple le cas de la France et, plus sommairement, celui d'un pays très ensoleillé. Il s'agit bien sûr d'un scénario théorique.

Est-il nécessaire de stocker l'énergie électrique ?

La consommation française d'électricité est voisine de 450 TWh/an ; ce qui représente une puissance moyenne de 51 GW. La puissance instantanée est généralement comprise entre 40 et 70 GW mais dépasse 70 GW quelques centaines d'heures par an en hiver. Elle peut approcher 100 GW notamment à cause du chauffage électrique.

La consommation provient actuellement pour 50 TWh de l'hydraulique, 25 TWh de l'éolien et du solaire, 60 TWh du thermique fossile (dont 20 importés) et un peu plus de 300 TWh du nucléaire. La production nucléaire est proche de 400 TWh mais environ 80 TWh sont exportés.

Quel est le réalisme d'une solution sans nucléaire basée sur l'éolien et le solaire à laquelle on adjoint un complément d'énergie thermique et hydraulique ?

Les études globales associant les énergies intermittentes avec le nucléaire, l'hydraulique, le thermique et le stockage par pompage entre deux lacs (STEP) sont très complexes, ce qui permet des affirmations parfois contradictoires et souvent peu réalistes : certains affirment que la répartition du vent sur le territoire permet d'éviter presque totalement l'emploi de nucléaire et d'énergies fossiles ; d'autres « démontrent » que l'emploi important d'éolien et de solaire nécessite une capacité tout à fait irréaliste de moyens de stockage.

On peut évaluer le besoin d'énergie thermique si elle était associée uniquement aux énergies intermittentes sans tenir compte de ressources hydrauliques ou de stockage. Pour cela on peut admettre par exemple l'hypothèse d'une production intermittente répartie pour 80 % en éolien et 20 % en photovoltaïque, leur production dépassant les besoins une partie du temps, d'où une perte significative de leur production si on ne stocke pas.

La puissance éolienne installée peut être par exemple de 100 GW à terre et 20 GW off-shore. Cela représente à terre un peu plus de 30 000 éoliennes de 3 MW sur 550 000 km² (à comparer à 20 000 éoliennes programmées en Allemagne en 2020 sur 350 000 km²). C'est un choix discutable mais pas irréaliste. La puissance photovoltaïque peut être de 60 GW nécessitant 1 000 km² dont une partie sur les bâtiments. La production annuelle correspondante, peu variable au total, est de 120 GW x 2 500 = 300 TWh pour l'éolien et 70 TWh pour le solaire, soit un total de 370 TWh. La répartition en pourcentage des 8 760 heures de l'année peut s'évaluer d'après les données météorologiques ; elle est représentée par la figure jointe basée sur des études existantes que l'on peut vérifier. Ces valeurs de production sont comparées à la demande de puissance moyenne de 51 GW et aux variations usuelles de cette demande (figure 1).

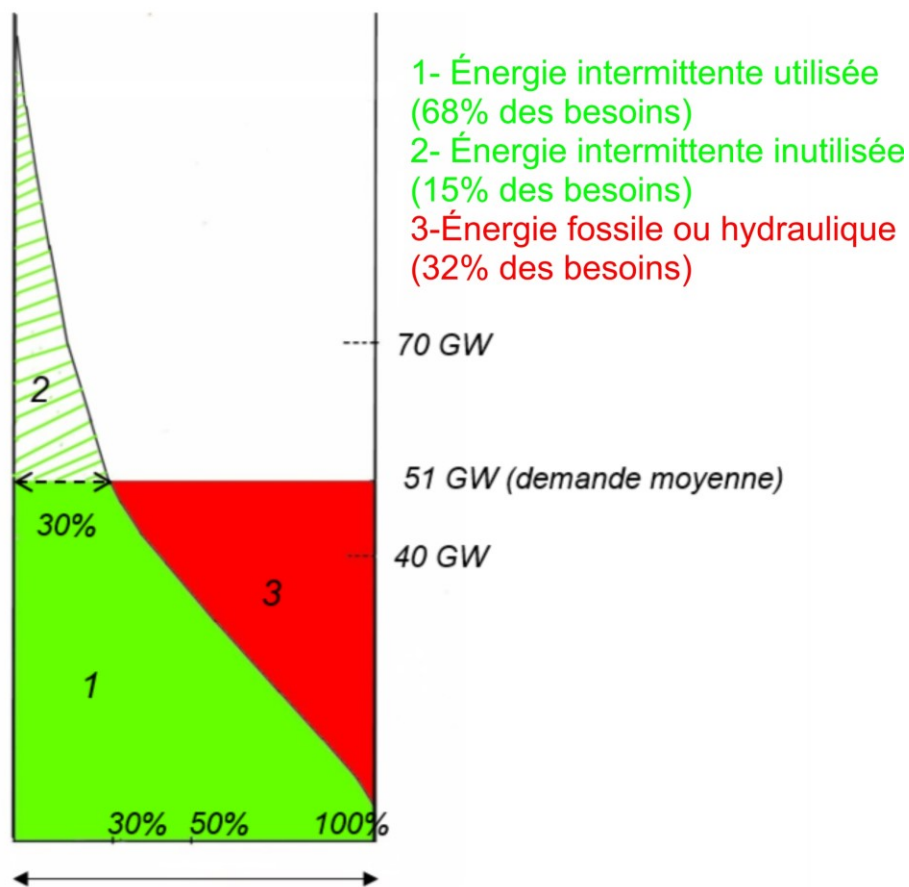


Figure 1. Répartition sur l'année de la puissance intermittente en France avec l'hypothèse de 80 % d'éolien et 20 % de solaire. Dans une année il y a 8 760 heures.

Il apparaît ainsi que :

- Pendant un tiers du temps la production intermittente est supérieure à la demande ; elle peut dépasser 100 GW ! et excéder alors la demande de plus de 50 GW. L'excédent annuel global correspondant ainsi inutilisé si on ne stocke pas est d'environ 50 TWh à déduire des 370 TWh produits.
- Pendant deux tiers du temps la production intermittente est inférieure à la demande, le déficit global annuel, c'est-à-dire le besoin d'énergie thermique (ou autre alternative) étant proche de 140 TWh. Cette évaluation de 140 TWh est probablement un

peu supérieure à la réalité : elle ne tient pas compte du fait que la demande de jour est supérieure à la demande moyenne, de même que la production. Il est par ailleurs possible, par la tarification, d'ajuster en partie la demande à l'offre, avec des horaires très différents des horaires actuels. Ce serait dans le cadre du réseau intelligent (smart grid).

Le besoin d'énergie thermique est réduit par la disponibilité de l'énergie hydraulique, dont la plus grande part est utilisable en fonction de la demande. C'est donc au moins 40 TWh qui peuvent se substituer à l'énergie thermique, 5 TWh peuvent être fournis par la biomasse.

Enfin les 5 GW de stations de pompage existantes (STEPs) peuvent pomper 30 % du temps en utilisant de l'énergie intermittente excédentaire soit $5 \times 2\,500$ heures = 12,5 TWh et restituer 10 TWh compte tenu des pertes. L'énergie thermique nécessaire est réduite à $140 - 40 - 5 - 10 = 85$ TWh.

Il est donc possible de produire 450 TWh à partir de près de 350 TWh d'énergie intermittente supplémentaire, 60 TWh d'énergie hydraulique existante et 85 TWh d'énergie thermique sans capacité nouvelle de stockage.

L'énergie thermique nécessaire de 85 TWh est supérieure à sa consommation actuelle qui est en moyenne sur 5 ans de 40 TWh produits en France et 20 TWh importés. L'augmentation nécessaire de capacité thermique est proportionnellement plus importante ; elle doit en effet compenser la disponibilité actuelle d'énergie nucléaire proche de 50 GW moins 10 GW de production intermittente minimale.

Surcoûts

L'option ci-dessus d'une électricité renouvelable à 80 % et thermique à 20 % est séduisante. Cependant, en l'absence de stockage complémentaire, elle utilise plus d'énergie thermique qu'actuellement (85 TWh au lieu de 60) et son coût direct doit être majoré de 3 surcoûts :

- Le coût de l'énergie excédentaire un tiers du temps, 50 TWh à déduire de 370 TWh. Le coût direct de production doit donc être pris en compte avec une majoration de $50/320$ soit environ 15%.
- Le coût des centrales thermiques nécessaires quand la production éolienne et solaire est très faible. Il faut 30 GW de capacité thermique complémentaire, c'est-à-dire un investissement de 20 milliards mal utilisés, donc un surcoût annuel de 1 à 2 milliards, environ 5 €/MWh d'énergie intermittente (1,5 milliard pour 300 TWh).
- La bonne répartition des productions entre régions nécessite un développement du réseau THT (très haute tension) de l'ordre de 10 lignes de 500 km à 2 millions €/km soit 10 milliards. La prise en compte de 1 milliard par an représente un surcoût de 3 €/MWh pour les énergies intermittentes. Le coût de ces lignes est comparable à celui des lignes associées au nucléaire.

En 2050, le coût direct du solaire et de l'éolien sera probablement proche de 60 €/MWh. Le surcoût lié à l'intermittence peut être estimé à :

- 5 €/MWh pour les centrales thermiques complémentaires
- 3 €/MWh pour les lignes électriques supplémentaires.
- $15 \% \times 60 = 9$ €/MWh d'énergie non utilisée soit 17 €.

Le surcoût des énergies intermittentes lié à l'intermittence est de l'ordre de 20 €/MWh pour 2050.

Est-il utile de stocker l'énergie électrique ?

Un développement très important des énergies intermittentes en France nécessite une capacité thermique accrue et un surcoût important à court terme mais n'impose pas d'augmentation des capacités de stockage d'énergie. Les nombreuses études associant ce développement à un besoin élevé de capacité de stockage évaluent parfois le besoin de stockage complémentaire à des valeurs étonnantes alors que ce complément n'est pas indispensable à l'emploi d'éolien et de solaire pour deux tiers de l'électricité pour autant que l'on accepte d'utiliser des centrales thermiques pour compenser en partie l'intermittence et d'émettre du CO₂ supplémentaire.

Une augmentation de stockage n'est cependant pas sans intérêt mais il est essentiel de distinguer le stockage à l'échelle de la journée ou de la semaine, du stockage à long terme, notamment saisonnier.

Plus de 90 % du stockage actuel à court terme est le stockage d'eau entre deux lacs situés à des altitudes différentes. La capacité de stockage représente aujourd'hui en France une puissance de 5 GW, soit environ 10 % de la puissance électrique moyenne et la production d'une énergie de 100 GWh. Ce stockage existant peut être utilisé des centaines de fois par an et permettra la réutilisation de 10 TWh d'énergie intermittente disponible gratuitement.

Cette solution est totalement inadaptée au stockage à long terme et notamment au stockage saisonnier ou mensuel, d'où une fréquente confusion, parfois volontaire et très dissuasive, pour l'utilisation des STEPs et des énergies intermittentes.

Le stockage par STEPs est intéressant à l'échelle de la journée, sa capacité peut atteindre 40 ou 50 % de la demande moyenne soit 20 à 25 GW pendant 5 à 10 heures par jour soit environ 0,2 TWh. Il peut être intéressant à l'échelle de la semaine pour stocker une part de l'énergie du week-end ou compenser partiellement une production intermittente faible sur quelques jours : l'intérêt peut être alors de l'ordre de 20 GW pendant 20 ou 30 heures soit 0,5 TWh intégrant le besoin journalier. Il est difficile de déterminer l'équipement optimum mais porter la capacité de STEPs de 5 à 20 GW et de 0,1 à 0,5 TWh est une option raisonnable.

Ajouter 15 GW de capacité aux STEPs existantes permet de pomper pendant 2 000 heures soit 30 TWh réduisant, compte tenu des pertes, d'environ 25 TWh la consommation d'énergies fossiles et de 15 GW la capacité de production fossile.

Le surcoût d'investissement, pour un coût moyen de STEPs de 1,50 M€/MW et d'usines thermiques de 0,50 M€/MW est donc de 15 GW x (1,5 million € - 0,5) = 15 milliards d'euros, soit une annuité d'environ 1 milliard €/an pour 25 GWh. En utilisant essentiellement de l'énergie gratuite excédentaire, on a un coût au MWh voisin de celui de l'énergie fossile dont la consommation peut être ainsi, sans surcoût notable, ramenée à 60 TWh/an, proche de la situation actuelle.

Il paraît difficile d'aller beaucoup plus loin avec les STEPs car un minimum d'énergie fossile est nécessaire pour assurer la majeure partie des besoins lors de faibles productions intermittentes pendant plusieurs jours mais aller jusqu'à 30 GW est peut-être rentable.

Les STEPs ont aussi le très grand avantage de flexibilité et de sécurité pour la gestion du réseau et pour faire face à des variations rapides de production éolienne ou solaire.

Cet investissement en STEPs peut être très progressif entre de 2030 et 2050.

Est-il possible de réaliser beaucoup de STEPs ?

Les 5 STEPs principales actuelles totalisent 5 GW et stockent 100 GWh. Leurs lacs occupent environ un pour cent de la surface des lacs de production hydraulique.

Il y a trois solutions pour des STEPs supplémentaires totalisant 15 GW et 0,5 TWh :

- Équiper des sites semblables aux sites actuels. S'il reste peu de sites de production disponibles, il reste de nombreux sites de stockage qui nécessitent peu de place.
- Adapter au stockage des sites existants de production hydraulique : la capacité actuelle de leurs lacs est de l'ordre de 10 TWh ! En adapter quelques pour cent au stockage est une option très réaliste.
- On peut utiliser la mer pour un ou deux des réservoirs d'une STEP. La capacité totalement offshore est illimitée. La surface nécessaire pour créer un bassin de 20 m de profondeur sur une falaise de 100 m de haut est, en km² par GW stocké 24 heures, d'environ 5 km². Une vingtaine de sites de falaises de quelques km² ont été identifiés. Le déplacement total de population serait de quelques centaines d'habitants pour 5 GW.

Les STEPs marines ont généralement l'avantage de créer 2 bassins contigus évitant ainsi les tunnels de quelques km entre réservoirs. Ceci permet une adaptation de la puissance pompée ou fournie plus rapide qu'avec les STEPs de montagne. Cette possibilité de STEPs marines est étudiée par ailleurs.

Le besoin de stockage mensuel ou saisonnier est faible, il n'est pas du ressort des STEPs que l'on a intérêt à utiliser des centaines de fois par an. On peut espérer ainsi utiliser 100 fois par an leur capacité de stockage.

L'ajustement saisonnier peut être assuré par la production hydraulique et l'utilisation d'énergie fossile principalement en hiver.

Il est donc difficile d'éviter complètement l'énergie fossile traditionnelle mais il semble possible de réduire sa part à environ 15 %, essentiellement par gaz naturel.

Autres moyens de stockage de l'énergie électrique

Diverses autres solutions de stockage d'énergie électrique ont été envisagées. Aucun stockage de masse ne semble actuellement à l'échelle des STEPs. De nouvelles solutions seraient les bienvenues mais il serait optimiste de se baser actuellement sur d'autres solutions de masse que les STEPs. Toutefois, deux solutions peuvent réduire sensiblement l'importance du stockage de masse nécessaire :

- Dans trente ans la recharge journalière d'une dizaine de millions de batteries de véhicules peut être adaptée par la tarification à la disponibilité d'énergie.
- D'une manière plus générale, la consommation électrique, avec les compteurs intelligents et un réseau intelligent peut être, dans une certaine mesure, adaptée aussi à la production, les heures creuses pouvant être très différentes des heures creuses actuelles.

Il est donc très possible que l'intérêt du stockage par STEPs soit limité à une puissance d'une vingtaine de GW. Il faudrait réaliser environ 15 GW supplémentaires essentiellement entre 2030 et 2050 avec une répartition entre STEPs de montagne et STEPs marines.

Les énergies intermittentes à l'échelle mondiale

Les pays industrialisés (Chine incluse) ont un climat et des ressources intermittentes assez proches des conditions françaises, étant situés sous des latitudes voisines et loin de l'équateur. L'étude pour la France semble assez représentative pour une population de 3 milliards d'habitants avec des besoins semblables, soit environ 40 fois la population française. L'intérêt du stockage est comparable. Une étude de l'AIE évalue à environ 500 GW la puissance de stockage nécessaire pour l'OCDE (pour environ 20 fois la population française).

Les pays actuellement peu industrialisés auront en 2050 une population de 6 milliards, avec une consommation électrique plus faible par habitant, mais globalement proche de celle des pays industrialisés. Les conditions climatiques et ressources y sont très spécifiques vu la proximité de l'équateur, un ensoleillement important et régulier, à l'exception de quelques mois de saison des pluies, et d'hydroélectricité importante. Un besoin important d'air conditionné se substitue au besoin de chauffage. La ressource éolienne est moins importante en général que sous les latitudes des pays industrialisés et la répartition éolien-solaire peut être l'inverse de la répartition française. Le pourcentage d'énergie hydraulique sera aussi en moyenne de 15 % de la consommation.

On peut ainsi envisager une électricité dont la consommation annuelle est basée sur 10 à 15 % d'énergie hydraulique, 15 % à 20 % d'énergie thermique, 50 % d'énergie solaire et 20 % d'énergie éolienne.

Pendant les huit mois de la saison sèche, le problème majeur sera l'équilibre journalier ; la production solaire est limitée à 30 % du temps, correspondant à 40 ou 50 % des besoins. La production hydraulique peut être principalement de nuit mais il sera aussi souhaitable de stocker un tiers de la consommation journalière avec une capacité correspondante égale à la moitié de la puissance moyenne consommée. Le développement hydraulique devra être axé sur le stockage autant que sur la production.

Pendant quelques mois de saison de pluies, la production solaire sera réduite de moitié, la consommation réduite, la production hydraulique importante.

L'importance du stockage par pompage peut être un peu plus grande que dans les pays industrialisés. Le coût de l'énergie solaire dans ces pays devrait être inférieur à 50 €/MWh, le coût total par MWh de l'électricité devrait être voisin de celui des pays industrialisés et peut-être plus faible. La ressource est illimitée.

En dehors de l'Inde, l'avenir du nucléaire paraît faible dans ces pays qui peuvent avoir 80 % d'énergies renouvelables, développables en grande partie par leurs propres moyens.

En deux mots

Il semble possible en France, sans stockage complémentaire d'énergie, de consommer en 2050 une électricité renouvelable à 80 % et fossile à 20 % adaptée à la demande. Le coût global au GWh pourrait être voisin de 80 €/MWh. Par contre, la quantité de CO₂ émise globalement augmentera par rapport à la situation actuelle.

Il est souhaitable et rentable d'investir un supplément de stockage en France de 15 à 20 GW pour ramener la part d'électricité fossile à moins de 15 %. Les STEPs paraissent la meilleure solution.

L'énergie électrique mondiale peut être renouvelable à près 80 %. Le stockage d'énergie n'est pas indispensable mais 2 000 GW de capacité de pompage peuvent être rentables.

27. Comment stocker la chaleur ?

En France, plus de 50 % de l'énergie primaire utilisée est transformée en chaleur. Presque la moitié de cette chaleur est consommée dans le bâtiment et ceci contribue presque au quart des émissions de gaz à effet de serre. Il est intéressant de stocker de la chaleur lorsque l'on a de l'énergie à faible coût permettant de la produire ou si l'on dispose de chaleur excédentaire par rapport aux besoins. La chaleur peut alors être utilisée ultérieurement lorsqu'on en a besoin.

Deux échelles de temps

On peut distinguer deux échelles de temps pour le stockage de la chaleur :

- Une échelle courte, de l'ordre du jour. On va par exemple produire de l'eau chaude à une période où l'électricité est abondante et pas chère (la nuit) et utiliser l'eau chaude sanitaire stockée dans la journée. C'est ce qui est fait dans des millions de foyers possédant un chauffe-eau électrique (cumulus).
- L'autre échelle de temps est longue, de l'ordre de plusieurs mois. Il s'agit par exemple de stocker la chaleur pendant la saison chaude pour l'utiliser durant la saison froide.

On a besoin d'eau chaude sanitaire toute l'année mais on ne chauffe que pendant la saison froide (bas de la figure 1). Si l'on utilise la chaleur du soleil, celle-ci est, en France, beaucoup plus importante en été qu'en hiver (haut de la figure 1). Il serait donc intéressant de stocker de la chaleur en été pour l'utiliser pendant la saison froide. C'est ce que l'on appelle le stockage intersaisonnier.

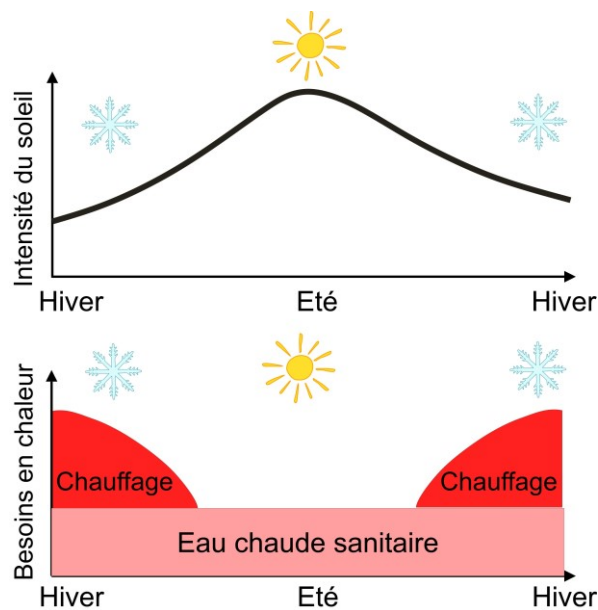


Figure 1. Schéma représentant l'intensité du soleil et les besoins en chaleur au cours de l'année.

Moyens de stockage

Il existe 3 grands moyens de stockage de la chaleur (figure 2) :

- On peut utiliser la capacité calorifique d'un matériau : de l'eau que l'on chauffe par exemple de 15 °C à 80 °C contient des calories que l'on peut récupérer par la suite. On qualifie cette propriété de chaleur sensible.
- On peut utiliser la chaleur latente lors d'un changement de phase d'un matériau (transformation glace-eau ou ébullition (transformation eau-vapeur), par exemple). Ces transitions de phase se produisent à une température fixe.
- On peut utiliser des réactions thermochimiques dans lesquelles on fait une transformation endothermique (qui absorbe de la chaleur) pour stocker la chaleur. Lorsque l'on veut récupérer celle-ci, la transformation inverse, exothermique, libère celle-ci. On peut ainsi conserver de la chaleur pendant un temps très long sans perte notable.

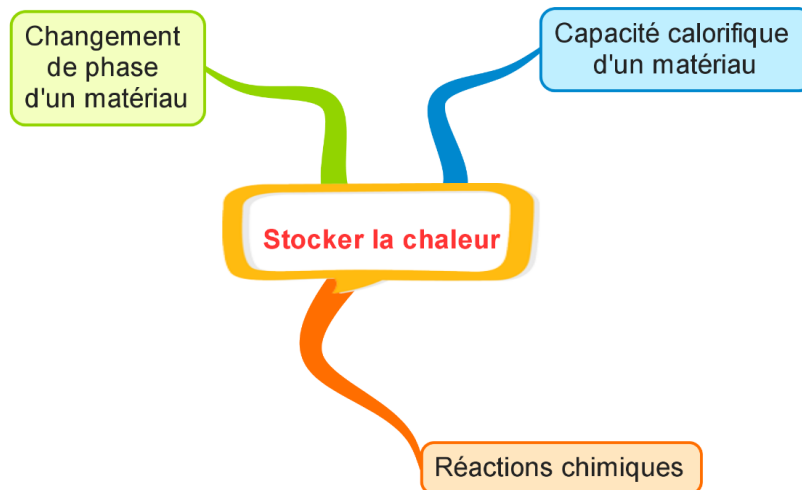


Figure 2. Trois méthodes pour stocker la chaleur.

L'eau est l'une des substances les plus performantes en termes de capacité calorifique (1,2 Wh/kg/°C, contre 0,25 Wh/kg/°C pour le béton). Il faut toutefois des quantités considérables d'eau pour stocker suffisamment de chaleur l'été pour pouvoir l'utiliser l'hiver. Pour mémoire, 1 kWh d'énergie thermique permet de porter 10 kg d'eau de 20 °C à 100 °C, de faire fondre 10 kg de glace à 0 °C ou de faire bouillir 1,5 kg d'eau à 100 °C. Lorsque l'on stocke de la chaleur avec de l'eau, on a des densités énergétiques très faibles. Par exemple si l'on prend de l'eau à 60 °C, en faisant baisser sa température de 30 °C on ne récupérera que 35 kWh/m³. Une maison de 150 m², relativement bien isolée, ayant une consommation de 100 kWh/m²/an pour son chauffage, a besoin de 15 000 kWh. Cela représente un volume de stockage équivalent à celui d'une piscine remplie d'eau de 20 m de longueur, sur 10 m de largeur et 2 m de profondeur.

L'ordre de grandeur des densités d'énergie que l'on peut stocker sous forme de chaleur avec des technologies performantes est d'environ 50 kWh/m³ sous forme de chaleur sensible, de 100-150 kWh/m³ pour des matériaux à transition de phase et supérieure à 300-500 kWh/m³ en utilisant des processus thermochimiques.

Pour produire de l'eau chaude sanitaire il faut environ 45 kWh/m³ (c'est l'énergie nécessaire pour chauffer de l'eau de 10 °C à 50 °C environ). Bien que ceci puisse être très variable d'un foyer à l'autre, il faut compter environ 50 litres d'eau chaude sanitaire par personne et par jour ce qui correspond à une consommation de 800 kWh par personne et par an. Le stockage et la distribution de l'eau chaude sanitaire sont sujets à des pertes qui dépendent de l'installation et peuvent augmenter significativement ces ordres de grandeur.

La pompe à chaleur

La pompe à chaleur permet de transférer de la chaleur d'une source à basse température vers une source à haute température. Ceci n'est pas possible spontanément et il faut fournir du travail. Pour réaliser cela, une pompe à chaleur consomme de l'électricité du réseau électrique. Son gros intérêt est d'être un amplificateur d'énergie. En consommant 1 kWh d'électricité elle est capable de produire 3 à 4 kWh de chaleur. Les 2 à 3 kWh supplémentaires proviennent de la source froide. On lui retire de la chaleur et elle se refroidit. C'est de la chaleur gratuite et l'on ne paye que l'électricité consommée. Pour une pompe à chaleur, le rendement est d'autant meilleur que la différence entre la température de la source chaude et de la source froide est faible.

On peut aussi utiliser de la chaleur à basse température, stockée dans l'air extérieur, le sol ou l'eau pour produire de la chaleur à plus haute température. C'est ce qui est fait habituellement. On pourrait aussi utiliser de la chaleur déjà stockée, comme l'eau contenue dans une piscine que l'on a laissée chauffer l'été. Dans ce cas le rôle de la pompe à chaleur est d'accroître la quantité de chaleur disponible en utilisant la piscine comme source froide. On pourrait alors se contenter d'un volume d'eau plus faible.

Le système de la pompe à chaleur s'applique aussi pour générer du froid. C'est le principe de fonctionnement des réfrigérateurs. On prélève de l'énergie à la source chaude pour refroidir la source froide. Toutefois, le rendement est plus faible que pour le chauffage. Typiquement, en consommant 1 kWh d'électricité on génère 2 à 3 kWh de froid.

En deux mots

La chaleur est la forme la plus dégradée de l'énergie mais elle a d'autant plus de valeur que sa température est élevée. On a besoin de chaleur dans les pays froids ou tempérés pour se chauffer l'hiver. On a besoin de froid pour la climatisation dans les pays chauds. Au XIX^e siècle, il y avait un commerce florissant de glace, récupérée dans les pays froids ou l'hiver. Cette dernière, qui stockait donc du froid, était transportée à de très grandes distances dans les régions chaudes du globe. Cette activité disparut avec l'introduction des machines frigorifiques.

En France, une grande partie de la chaleur sert à chauffer l'habitat et à produire de l'eau chaude sanitaire. Stocker la chaleur à court terme, comme ce qui est fait par les 11 millions de cumulus existant en France, est intéressant pour lisser la consommation d'électricité puisque l'eau est chauffée la nuit, lorsque la consommation électrique est faible, pour être utilisée le jour, lorsque cette consommation est forte. Il est plus difficile de stocker la chaleur l'été pour l'utiliser l'hiver car cela demande des volumes importants.

L'utilisation de pompes à chaleur peut être très utile pour extraire de la chaleur ou du froid du milieu extérieur. Elles peuvent être aussi utilisées pour amplifier la quantité de chaleur

stockée par un autre moyen. Ce qui est sûr est qu'il y aura dans l'avenir un développement important des pompes à chaleur, donc une demande croissante en électricité.

28. Les transports

On peut aujourd'hui facilement se déplacer à bas coût sur de grandes distances. Il est aussi facile et peu cher de transporter des marchandises d'un point à un autre du globe. Les transports sont indispensables à l'économie mais utilisent, pour leur grande majorité, des produits pétroliers comme source d'énergie. Par exemple, en 2005, le pétrole représentait 95 % de l'énergie totale consommée dans les transports (2,2 Gtep). Cela conduit à l'émission de grande quantité de CO₂ dans l'atmosphère. La mobilité des hommes ou des marchandises peut se faire par terre, mer ou air.

Transports sur terre, sur mer et dans les airs

Le transport routier consomme plus de 46 % du pétrole utilisé dans le monde. En 2009, le nombre de véhicules en circulation a dépassé le milliard. En 2015, 90 millions de véhicules ont été fabriqués dans le monde, soit presque 3 véhicules par seconde. Les trois quarts étaient des véhicules particuliers (<http://oica.net>).

La consommation de pétrole pour les transports est de l'ordre de 50 Mtep par an en France ce qui représente environ un million de barils de pétrole par jour. À titre de comparaison, la consommation de pétrole pour les transports au États-Unis est un peu supérieure à 20 millions de barils par jour.

On peut utiliser la mer, les fleuves, les rivières, les canaux, les lacs. Le transport par voie d'eau est particulièrement économique en termes d'énergie consommée. Avec une puissance de 1 kW on peut transporter environ 5 000 kg de fret par voie d'eau contre 200 kg par camion.

Le transport aérien s'est fortement développé et démocratisé depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Le nombre de passagers transportés chaque année est impressionnant : 3,12 milliards en 2013. Il y a chaque jour environ 80 000 vols ce qui représente environ 30 millions de vols par an. Un avion décolle toutes les secondes dans le monde et il a environ 500 000 personnes dans le ciel à chaque instant. L'aviation civile représentait, en 2010, 2,5 % des émissions de CO₂ mondiales et 11,5 % de celles dues au transport.

Émissions de CO₂

Pour un véhicule fonctionnant à l'essence ou au diesel, les émissions de CO₂ sont proportionnelles à la consommation de carburant. La figure 1 montre la quantité de CO₂ émises lors de la consommation d'un litre d'essence ou de diesel. On sait que les consommations normalisées données par les constructeurs sous-estiment toutes la réalité car elles sont effectuées dans des conditions particulières qui n'ont rien à voir avec l'utilisation normale d'un véhicule. Par exemple, un véhicule à essence émettant en moyenne 150 g de CO₂/km, consomme 6,4 litres aux 100 km. S'il parcourt 15 000 km dans l'année, il aura émis 2,25 tonnes de CO₂. Un véhicule qui émet 120 g de CO₂/km consomme 5,1 l/100 km s'il est à essence et 4,5 l/100 km s'il roule au diesel.

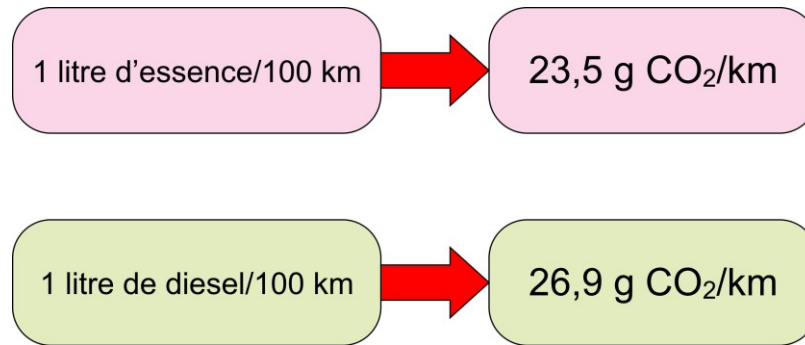


Figure 1. Quantité de CO₂ émise par kilomètre lors de la consommation d'un litre de carburant pour 100 km selon la nature de celui-ci.

Comme plus de 90 % de l'électricité française est produite sans émission de CO₂, l'utilisation de l'électricité dans les transports permet de réduire ces émissions par rapport à l'utilisation de produits pétroliers. Le rail, qui bénéficie aussi des faibles frottements fer sur fer entre les roues et les rails, est économe en énergie. Si la propulsion est électrique, l'économie en énergie et en émissions de CO₂ est particulièrement spectaculaire. La consommation annuelle d'électricité des trains électriques français est d'environ 7 TWh. Cela correspond à des émissions de CO₂ que l'on peut estimer à 0,6 Mt/an, soit l'équivalent de 25 000 voitures émettant 150 g CO₂/km.

L'avantage important du train par rapport à la route est réduit dans beaucoup de cas du fait qu'une liaison de passagers ou de fret par rail est complétée par deux transports routiers en début et fin de parcours.

Il est difficile d'évaluer précisément les émissions de CO₂ par passager des moyens de transport car, pour un véhicule donné, cela dépend du nombre de passagers transportés simultanément, du type de transport, etc. Ainsi, une voiture émettant 120 g de CO₂/km transportant quatre personnes correspondra à des émissions de 30 g de CO₂/km pour chacune d'entre elles. Pour donner un ordre d'idée, le moyen de transport le moins émetteur de CO₂ est le bateau, suivi du train, du bus, de la voiture en milieu extra-urbain à égalité avec l'avion long-courrier et la voiture en ville à égalité avec l'avion moyen-courrier. Le passager d'un avion émet typiquement entre 130 et 150 g de CO₂ par kilomètre.

Les transports en commun

Les transports en commun ne sont viables que s'il y a assez de voyageurs, donc dans des zones fortement peuplées. S'il n'y a pas assez de voyageurs ces transports ne sont pas viables et ne peuvent fonctionner que subventionnés par la collectivité. Parfois il peut être plus économique de mettre en œuvre des taxis à la demande que de faire rouler des bus vides ou avec un ou deux passagers. C'est le choix fait par certaines communes.

La plupart des gens n'habitent pas près d'une gare ou une station d'autobus. Il faut prévoir des parkings gratuits ou peu chers afin que les gens puissent se garer le matin, prendre le transport en commun et récupérer leur voiture le soir. Ces parkings sont encore trop peu nombreux et lorsqu'ils existent sont souvent chers. Par conséquent, l'automobiliste n'est pas encouragé à prendre les transports en commun et utilise sa voiture tout le long du trajet. On peut imaginer des communes recevant une petite compensation financière de la collectivité pour héberger chez elles un parking. Cela permettrait de favoriser l'utilisation des transports en commun pour les personnes habitant loin d'une gare.

Les tramways étaient très populaires au début du vingtième siècle et il y avait, dans les années 1920-1930, des milliers de kilomètres de lignes. Ils ont peu à peu disparu dans les années cinquante et il n'ont réapparu qu'en 1992 dans la région parisienne avec seulement douze kilomètres de ligne. Ce moyen de transport est actuellement à la mode et en plein développement. Il nécessite des travaux d'aménagement longs et coûteux pour réaliser les voies. Bien qu'il y ait des tramways plus courts, la longueur typique du véhicule est entre 37 et 45 m. L'achat et l'entretien des véhicules ont aussi un coût élevé. Si le tramway se justifie lorsque le débit est supérieur à 2 500 voyageurs à l'heure, il y a des solutions plus simples et moins coûteuses pour des flux inférieurs. Il s'agit des bus à haut niveau de service (BHNS).

Les BHNS demandent moins d'investissements que les tramways et leur voie de circulation réservée est très vite mise en œuvre car elle ne nécessite pas de gros travaux. Il y a différentes longueurs de bus allant jusqu'à 24 m. Pour donner un ordre de grandeur pour la ville de Bordeaux, par exemple, la construction d'une ligne de tramway coûte entre 25 et 30 M€ le km alors que celui d'un tram'bus est de 8 à 10 M€/km. Un autre avantage est qu'un BHNS peut être facilement dévié s'il y a un problème sur la voie dédiée ce qui n'est pas le cas pour un tramway. Toutefois, si l'on considère le coût de la maintenance, les tramways peuvent s'avérer avantageux que les BHNS.

Les véhicules hybrides

Lorsque l'on a un véhicule classique, fonctionnant avec un moteur à combustion interne alimenté par de l'essence ou du diesel, tout freinage ou ralentissement est de l'énergie perdue. Si l'on arrive à un feu rouge, le fait de ralentir et de s'arrêter transforme l'énergie cinétique du véhicule en chaleur dans les plaquettes de frein et dans les disques ou tambours. Lors du démarrage, toute l'énergie pour propulser le véhicule vient du moteur à combustion interne.

Un véhicule hybride possède un moteur à combustion interne, un moteur électrique et une batterie qui peut être soit rechargée par le moteur à combustion interne mais aussi lors d'un freinage ou d'une décélération (freinage régénératif). Ainsi lors du ralentissement et l'arrêt à un feu rouge, une partie de l'énergie cinétique de la voiture est transformée en électricité et stockée dans la batterie. Au démarrage, cette énergie peut être utilisée pour participer à la propulsion du véhicule. Ce type de véhicule est très efficace en ville et l'on peut atteindre 20 à 30 % d'économie de carburant grâce à la régénération.

Le véhicule hybride peut être aussi rechargeable (plug-in hybrid), c'est-à-dire que l'on peut recharger la batterie chez soi, sur le réseau électrique. Une autonomie de la batterie de 40 à 60 km permet à la plupart des gens d'assurer leur transport dans la journée pour aller au travail ou faire des courses. Cette autonomie n'est pas suffisante pour de longues distances, comme un départ ou retour de vacances, par exemple. Dans ce cas le moteur à combustion interne est utilisé. Si l'on ramène la quantité d'essence consommée dans l'année au nombre de kilomètre parcouru (dont la majeure partie a été faite dans le mode électrique), on peut espérer atteindre des consommations moyennes de l'ordre de 1 à 2 litres de carburant fossile aux 100 km.

Le gros intérêt du véhicule hybride qu'il soit rechargeable ou non est de pouvoir couvrir de grandes distances ce qui n'est pas le cas du véhicule électrique dont l'autonomie est limitée et dont la batterie demande plus longtemps pour être rechargée.

Le véhicule électrique

Le véhicule électrique est constitué d'un moteur électrique et d'une batterie. On recharge cette batterie sur le réseau électrique. Comme sa capacité est importante pour avoir une autonomie acceptable, ce temps est long, de l'ordre de la nuit. On peut utiliser des bornes de recharge rapide mais cela réduit la durée de vie de la batterie. Comme pour le véhicule hybride, le véhicule électrique récupère l'énergie de freinage ou de décélération. Le problème majeur de ce type de véhicule est l'autonomie et le prix de la batterie. Cette dernière est très chère et n'a pas une durée de vie élevée sans dégradation de performances. Pour cette raison, elle n'est généralement pas vendue mais louée.

Le problème majeur de la voiture électrique est son autonomie. Beaucoup de voitures ont une autonomie de l'ordre de 150 km. Cette distance doit être entendue en terrain plat, dans de bonnes conditions, et en particulier sans vent contraire. Sur une route en côte, comme celle que l'on peut trouver en sortie de Paris à Sèvres, par exemple, 1 km de parcours est l'équivalent de 7 km en plat. Par contre, dans une telle descente, la consommation est pratiquement nulle et l'on recharge la batterie. Le problème majeur du véhicule électrique est moins son autonomie que le temps nécessaire à recharger la batterie. Si cela pouvait se faire en quelques minutes, il pourrait être utilisable sur de grandes distances même si son autonomie est faible.

Un parcours la nuit consomme une énergie supplémentaire à cause des lumières. Cette consommation peut être minimisée en utilisant des Leds (light emitting diodes). Le chauffage demande aussi beaucoup d'énergie par temps très froid car on utilise une pompe à chaleur dont le rendement chute aux basses températures. La climatisation, lorsqu'il fait chaud, est un poste de consommation d'énergie supplémentaire mais moindre que le chauffage.

La recharge d'une batterie demande du temps, 7 à 8 heures. Il existe des bornes de recharge rapide qui effectuent une recharge complète en quelques heures mais elles ont besoin de beaucoup de puissance. Un grand nombre de véhicules ne pourraient pas les utiliser simultanément sous peine de mettre en difficulté le réseau électrique. Les batteries perdent leurs performances au cours du temps, spécialement chez les véhicules électriques, car elles subissent des décharges profondes. La dégradation des performances est moindre pour les véhicules hybrides car seule une faible partie de la batterie est déchargée ce qui augmente considérablement leur durée de vie.

Dans un pays comme la France, la voiture électrique ou hybride rechargeable permet d'émettre peu de CO₂ car l'électricité qu'elle utilise est produite majoritairement avec des sources d'énergie non émettrices de CO₂ (nucléaire, hydraulique et autres énergies renouvelables). Par contre, dans les pays produisant leur électricité avec des centrales à charbon, comme c'est le cas en Allemagne ou en Chine, les émissions de CO₂ sont à peine inférieures et parfois supérieures par rapport aux véhicules classiques. Le seul intérêt du véhicule électrique est alors de réduire fortement la pollution en ville et de la reporter à l'endroit où l'électricité est produite, c'est-à-dire en dehors de la ville.

Quelques chiffres

On peut donner quelques ordres de grandeur relatifs à la consommation d'énergie des véhicules. Pour un véhicule moyen et une conduite souple, il faut environ 150 Wh pour parcourir 1 km, soit 15 kWh/100 km. Pour un véhicule à propulsion classique et un rendement

d'environ 20 % du moteur à combustion interne, cela correspond à une consommation d'essence de 7,5 l/100 km.

Si l'on considère un moteur électrique, son rendement est pratiquement de 100 %. En supposant 20 % de récupération par freinage, cela conduit à 12 kWh pour couvrir une distance de 100 km. Pour avoir une autonomie de 200 km, il faut de l'ordre de 25 kWh, ce qui représente environ 200 kg de batterie Li-ion.

En deux mots

Le transport est un élément essentiel de la vie économique et sociale. Les transports en communs ainsi que les véhicules individuels jouent un rôle important pour la mobilité des individus.

Les transports en commun ne sont rentables que si un grand nombre de passagers les empruntent, donc dans des zones de population dense lorsqu'il s'agit de courtes distances. La plupart du temps la mobilité sera multimodale, c'est-à-dire qu'il faudra plusieurs moyens de transport pour aller d'un endroit à un autre. Lorsque la voiture est utilisée pour une partie du trajet, il faudrait qu'elle puisse se garer facilement et à faible coût près d'une gare ou station de transport. D'autre part, pour le même prix et avec un délai plus court de mise en œuvre, il est possible de réaliser des lignes de bus à haut niveau de service plutôt que des tramways. Pour un même budget on peut ainsi mettre en service un plus grand nombre de kilomètres de transports en commun.

Au niveau des véhicules individuels, les véhicules hybrides rechargeables ou non semblent la solution la plus prometteuse à moyen terme car ils peuvent parcourir n'importe quelle distance ce qui n'est pas le cas des véhicules électriques dont le rayon d'action est limité par la quantité d'énergie contenue dans la batterie qui met longtemps à se recharger comparé au temps nécessaire à faire un plein de carburant. Pour le moment, les principaux problèmes du véhicule électrique sont l'autonomie et le temps de recharge de la batterie. Si l'on pouvait disposer de véhicules ayant une autonomie de l'ordre de 500 km, les véhicules électriques s'imposeraient rapidement. Mais il faudrait que l'électricité soit produite sans émission de gaz à effet de serre.

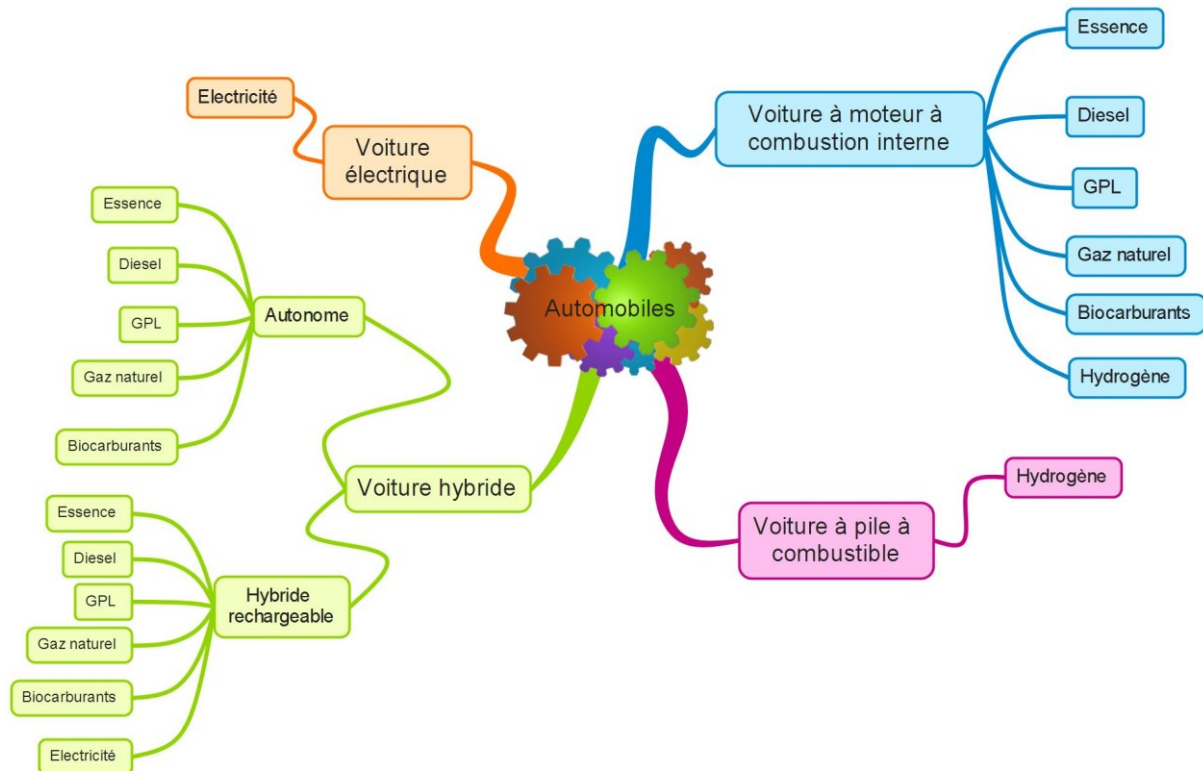


Figure 2. Quelques types de véhicules et les sources d'énergie qui peuvent être utilisées

Pour un futur plus lointain, le véhicule à pile à combustible fonctionnant avec de l'hydrogène obtenu par électrolyse à partir d'électricité produite sans émission de gaz à effet de serre est peut-être une solution. Ce véhicule sera de toute manière hybride, la pile à combustible remplaçant le moteur à combustion interne du véhicule hybride actuel. Toyota a récemment commercialisé au Japon la MIRAI, une voiture à pile à combustibles dont l'agrément de conduite est équivalent à celui d'un véhicule hybride ou conventionnel. Le problème qu'il reste à résoudre est le nombre de station de ravitaillement.

Pour résumer, la figure 2 montre quelques possibilités de véhicules individuels ainsi que les sources d'énergie possible. Certaines possibilités ne sont qu'à l'état de prototype ou d'idée.

En 2050, une grande partie des transports pourra utiliser de l'électricité décarbonée mais une part substantielle d'entre eux dépendra encore du pétrole ainsi que de la biomasse (biocarburants) et peut-être de l'hydrogène.

29. L'habitat

Presque la moitié de l'énergie primaire est consommée en France dans l'habitat. Cette énergie sert à chauffer ou climatiser les locaux, à produire de l'eau chaude sanitaire, à fournir de l'électricité pour des usages spécifiques, etc. L'habitat est un gouffre énergétique (40 % de l'énergie primaire consommée en France, plus de 30 % des émissions de gaz à effet de serre) mais aussi une mine d'économies potentielles. Avec les technologies existantes, il est maintenant possible de construire des bâtiments consommant beaucoup moins d'énergie que dans le passé.

Une évolution lente

On construit en moyenne, en France, de l'ordre de 300 000 à 400 000 logements neufs par an selon les années. Le parc immobilier comprend un peu plus de 30 millions de logements et 814 millions de m² de bâtiments tertiaires. Pour le résidentiel, l'habitat collectif représente un tiers des habitations et les maisons individuelles deux tiers. Il faut donc de l'ordre d'un siècle pour renouveler le parc immobilier. C'est une échelle de temps très longue, particulièrement lorsque l'on considère les mesures à prendre pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre.

Les bâtiments construits avant 1975 étaient peu isolés et fortement consommateur d'énergie. Ils consommaient en moyenne de l'ordre de 330 kWh/m²/an. Les logements étaient trop chauffés afin que celui qui était le plus froid du bâtiment ait la température minimale requise, élevée à l'époque comparée à aujourd'hui. La régulation de température se faisait le plus souvent en ouvrant les fenêtres pour évacuer la chaleur.

Les bâtiments construits sous la réglementation thermique 2000 (RT 2000) consomment entre 80 et 100 kWh/m²/an, soit environ trois fois moins. On sait maintenant bâtir des locaux consommant de l'ordre de 50 kWh/m²/an et même des bâtiments zéro énergie ou à énergie positive c'est-à-dire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Le problème principal reste toutefois les bâtiments anciens qu'il faudrait rénover à grande échelle.

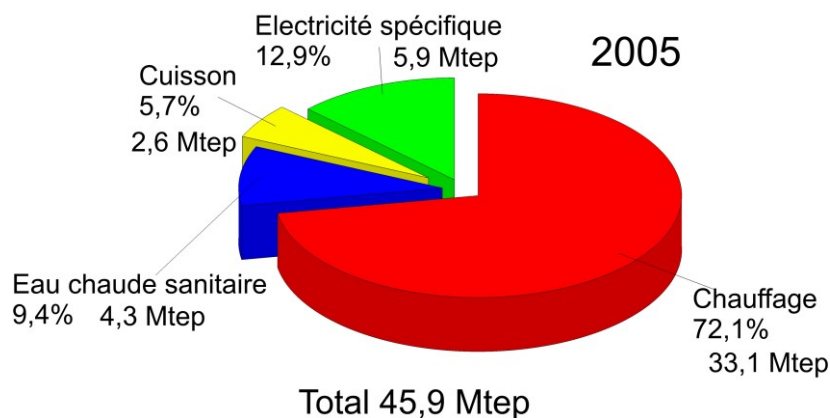


Figure 1. Consommation d'énergie par usage dans le résidentiel en France en 2005. Source DGEMP, l'énergie, 2007.

Consommation énergétique

La figure 1 montre la répartition de la consommation d'énergie selon les usages pour le résidentiel en France. Le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire représentent une grande partie de l'énergie consommée. C'est aussi le cas pour le secteur tertiaire qui consommait 20,3 Mtep d'énergie primaire en 2005 qui se répartissaient en 9,7 Mtep pour le chauffage (48 %), 3,4 Mtep pour l'eau chaude sanitaire et la cuisson (16,8 %) et 7,1 Mtep (35,1 %) pour l'électricité spécifique.

Il faut rénover

Les logements sont anciens pour leur grande majorité. Ils ont pour la plupart été construits à une époque où les économies et l'efficacité énergétique n'étaient pas une priorité. En investissant un peu en isolation on peut réduire notablement la consommation et gagner une centaine de kWh/m²/an. Ce coût est bien inférieur à celui nécessaire pour obtenir le même gain dans une maison neuve (par exemple pour passer de 100 kWh/m²/an à une maison zéro énergie). Le nombre de constructions anciennes étant bien supérieur au nombre des constructions neuves, la rénovation d'un grand nombre de logements anciens permettrait un gain énergétique important au niveau du pays.

De nouvelles techniques doivent être développées afin de faire de la rénovation « non invasive », c'est-à-dire ne perturbant pas la vie de l'habitant. Actuellement, beaucoup de rénovations se font de l'intérieur ce qui perturbe fortement les habitants du logement et peut réduire la surface habitable. Il faut donc de plus en plus développer des techniques de rénovation par l'extérieur. L'intérêt d'une isolation par l'extérieur est que l'on traite en partie les ponts thermiques du bâtiment qui sont souvent un défaut de conception source de perte d'énergie.

La figure 2 montre la part des différentes contributions des déperditions thermique d'une maison. On voit qu'il est plus efficace d'isoler un toit que de changer des fenêtres.

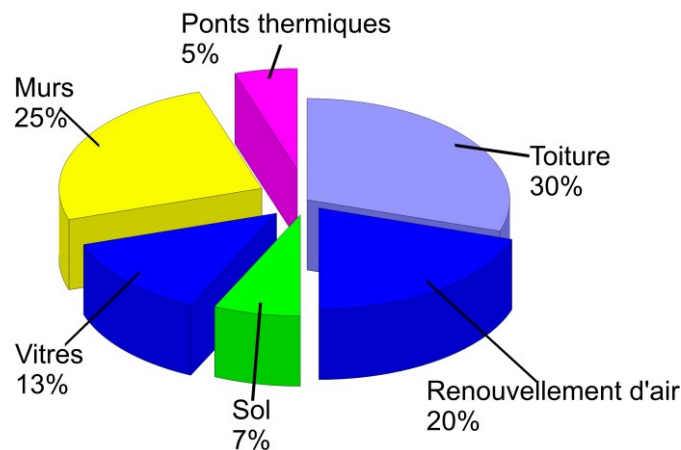


Figure 2. Déperditions thermiques d'une maison. Source Énergies alternatives, J.Bonal et P.Rossetti, Omnisciences, 2007.

Constructions neuves

La construction d'un logement ou d'un bâtiment neuf doit être traitée de manière globale pour optimiser la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Il n'y a pas de solution générale mais on peut s'appuyer sur un certain nombre de secteurs indiqués

dans la figure 3. La RT2012 (50 kWh/m²/an d'énergie primaire) doit être prise en compte dans cette conception.

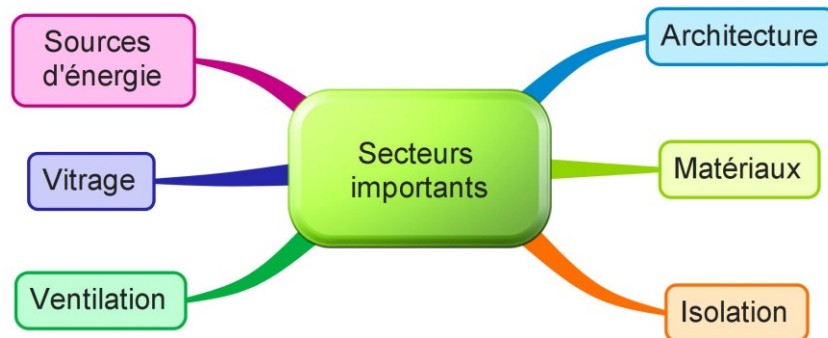


Figure 3. Secteurs importants dont il faut tenir compte lors de la construction d'une maison neuve.

L'architecture d'une maison a une influence sur la consommation d'énergie et cette caractéristique durera toute la vie du bâtiment. Compte tenu des contraintes extérieures (localisation, région, climat, etc.) il faut donc convenablement choisir l'orientation, la structure, les ouvertures, etc. Une maison avec un étage est par exemple plus économe en chauffage qu'une maison de plain-pied.

Le transfert d'énergie thermique d'un corps vers un autre ou vers l'extérieur peut se faire de trois manières différentes : par **conduction**, par **convection** ou par **radiation**. Par conduction, il n'y a pas de transfert de matière contrairement à la convection. Le transfert par radiation s'effectue avec des ondes électromagnétiques.

Le meilleur isolant est le vide comme on peut le vérifier avec une bouteille thermos. Le liquide à l'intérieur reste chaud parce qu'il est isolé dans une enveloppe de verre contenant du vide. L'air est un bon isolant thermique (sa conductivité thermique vaut 0,024 W/m.K), bien meilleur que l'eau (dont la conductivité thermique vaut 0,6 W/m.K). Un bon isolant peut utiliser l'air à condition que ce dernier ne puisse pas se déplacer sinon il y aurait transfert thermique par convection. Les isolants thermiques sont en général composés de matériaux enfermant de petits volumes d'air de manière à ce que celui-ci reste immobile. Cet isolant doit rester sec.

L'habitat moderne est basé sur le principe que les locaux sont isolés de l'extérieur et que tout échange d'air avec l'intérieur est contrôlé. Il est donc nécessaire de ventiler les locaux d'une part pour des raisons sanitaires, d'autre part pour éliminer l'humidité présente à l'intérieur. Une mauvaise ventilation peut favoriser les moisissures, les champignons et les acariens avec des conséquences négatives sur la santé des habitants. C'est un des problèmes qui va arriver avec les nouvelles constructions qui sont très isolées. Un dysfonctionnement toujours possible du système de ventilation peut induire des effets importants sur la santé car on ne s'aperçoit généralement pas tout de suite des baisses de performance de celui-ci.

On utilise maintenant des doubles ou triples vitrages. Les vitres peuvent parfois mieux isoler que les murs lorsque l'on fait de la rénovation de locaux anciens. Un **triple vitrage** est environ deux fois plus efficace qu'un double vitrage pour les pertes thermiques. Le double vitrage est lui-même environ 5 fois plus efficace qu'un vitrage simple. Selon l'orientation, il peut être parfois plus judicieux d'utiliser un double vitrage qu'un triple vitrage.

Le choix de la source d'énergie est important en matière de budget et d'impact sur l'environnement. De nombreux logements et bâtiments sont encore chauffés avec des combustibles fossiles, essentiellement du gaz naturel et du fioul domestique. Le gaz naturel émet, pour la même quantité de chaleur produite, moins de CO₂ que le fioul domestique. Il est aussi moins polluant en termes d'émissions que le fioul mais émet quand même du CO₂.

Le chauffage électrique et/ou l'utilisation d'énergies renouvelables nécessitent des logements bien isolés. Plus cher au kWh consommé, l'avantage du chauffage électrique est qu'il est possible de régler précisément la température d'une pièce. C'est plus difficile avec un système à fioul ou à gaz car la fermeture d'un radiateur dans une pièce déséquilibre souvent le reste de l'installation. En France, où l'électricité est majoritairement produite sans émission de CO₂, son usage est intéressant pour le bilan CO₂. Dans d'autres pays, où l'on produit une grande partie de l'électricité avec des centrales à charbon, le chauffage électrique n'est pas intéressant au point de vue environnemental.

Transports et habitat

Les transports et l'habitat sont intimement liés. L'idéal serait d'habiter pas trop loin de son pôle d'activité. Les transports et l'habitat représentent en effet en moyenne plus de 80 % de l'énergie consommée par une famille. Il faut donc avoir une approche énergétique globale et traiter simultanément ces deux postes de consommation afin de minimiser leur somme.

Comme l'immobilier est très cher, on peut être tenté d'habiter loin de son lieu de travail en utilisant l'économie sur l'investissement pour faire des travaux permettant de disposer d'un logement plus économe en énergie. Mais un gain en énergie de 80 kWh/m²/an dans le logement peut être annulé si l'on doit faire 20 km de plus par jour en voiture pour aller au travail.

L'idéal, en termes énergétiques, est d'habiter dans une ville comme Paris car l'habitat est compact, sans qu'il y ait beaucoup d'immeubles trop hauts. De plus, il existe un très bon réseau de transports en commun. En effet, au niveau des transports entre deux points A et B situés dans la même ville, ce qui est important c'est non seulement le temps nécessaire pour aller de A à B mais aussi la connectivité entre ces deux points, c'est-à-dire l'existence de plusieurs trajets possibles. Si l'une des lignes de transport a un problème, il est alors possible de trouver un autre trajet pour rejoindre B. Cette connectivité manque pour les transports desservant la grande banlieue

Pour l'habitat, il faut éviter les villes-dortoirs situées loin des pôles d'activité car cela entraîne non seulement de longs déplacements mais aussi du temps perdu dans les embouteillages. Il n'est d'ailleurs pas toujours possible d'habiter près de son lieu de travail car ce n'est pas toujours celui du conjoint qui peut alors être très éloigné du sien. On a remarqué qu'un couple qui s'installait initialement près du lieu de travail de l'un d'entre eux déménageait souvent au bout d'un certain temps pour habiter dans un lieu intermédiaire entre le lieu de travail des deux conjoints.

Comme le prix des logements, que ce soit à l'achat ou à la location, est élevé près des gares ou arrêts des transports en communs, une grande partie de la population habite à une distance de ceux-ci qui ne peut se faire à pied. Si l'on ne prévoit pas des parkings bon marché et ayant un grand nombre de places au voisinage de ces gares ou arrêts de transports, la voiture sera utilisée pour faire de grandes distances créant ainsi plus d'embouteillages et de

pollution. Cette pollution sera d'autant plus importante que les personnes habitant loin des moyens de transport n'ont pas forcément de gros revenus et utiliseront des véhicules âgés, donc très polluants.

En deux mots

L'habitat utilise presque la moitié de l'énergie primaire consommée en France. Il est possible, dans ce secteur, de réaliser d'importantes économies d'énergie et d'émettre moins de gaz à effet de serre. Comme l'habitat est essentiellement constitué d'anciens logements ou bureaux, la rénovation est un domaine crucial car c'est le seul qui permettra de réduire fortement la consommation d'énergie du pays, la construction de logements neufs ne représentant que peu de chose. Les énergies renouvelables peuvent permettre de diminuer la consommation en énergies fossiles mais leur utilisation demande que les logements soient bien isolés.

L'isolement des logements anciens est un des meilleurs investissements sur le plan économique et justifie un soutien public important car ils sont beaucoup plus rentables que ceux effectués pour l'éolien et le solaire si l'on considère le coût de la tonne de CO₂ évitée. Cependant, si le chauffage et la climatisation se font déjà avec de l'électricité décarbonée, le gain est surtout économique plutôt qu'en émission de CO₂.

La situation actuelle de véhicules à essence ou diesel et d'habitats individuels mal isolés chauffés au gaz naturel ou au fioul pousse à un habitat concentré pour réduire les émissions de CO₂. La situation future utilisant des transports décarbonés à 2, 3 ou 4 roues et un habitat mieux isolé alimenté en électricité décarbonée permettront un habitat plus dispersé encouragé par les progrès extraordinaires des télécommunications.

30. Le vecteur hydrogène

Largement utilisé aujourd'hui dans l'industrie, l'hydrogène va jouer un rôle de plus en plus important dans le futur comme vecteur énergétique. Comme il n'existe à l'état naturel qu'en très faibles quantités, il faut de l'énergie pour le fabriquer à partir de l'eau, du gaz naturel, du pétrole ou de la biomasse. Son gros avantage est de ne produire que de l'eau lorsqu'il réagit avec l'oxygène tout en libérant de l'énergie. S'il a été produit sans émission de CO₂, c'est-à-dire en utilisant de l'électricité produite par des énergies renouvelables ou du nucléaire, cela en fait un vecteur énergétique particulièrement propre.

Abondant dans l'univers

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers (92,8 % en nombre d'atomes et environ 75 % en masse). On le trouve sous la forme d'ion (H⁺), d'atome (H) ou de molécule (H₂). Cette molécule, le dihydrogène, est intéressante car, réagissant avec de l'oxygène, elle libère de l'énergie tout en ne produisant que de l'eau.

L'hydrogène est abondant sous forme d'atomes dans certaines molécules. On les trouve dans l'eau (71 % de la surface terrestre est couverte par les océans), dans les combustibles fossiles et la biomasse (végétaux, êtres vivants). On peut fabriquer de l'hydrogène moléculaire à partir de ces composés mais cela demande de l'énergie. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire puisqu'il faut de l'énergie pour le produire. C'est un vecteur énergétique qui permet de transporter de l'énergie d'un point à un autre et d'utiliser cette énergie là où l'on en a besoin. C'est donc l'analogue de l'électricité qui est aussi un vecteur énergétique avec toutefois une différence. L'électricité ne se stocke pas dans les câbles alors que les tuyaux transportant l'hydrogène servent aussi de moyen de stockage comme c'est le cas du gaz naturel. On peut aussi le stocker sous pression ou liquide dans des réservoirs.

On produit actuellement environ 50 millions de tonnes d'H₂ par an ce qui représente un contenu énergétique de 130 Mtep, soit environ 1 % de l'énergie primaire consommée dans le monde. C'est un volume considérable (environ 550 milliards de Nm³/an soit 85 Nm³ par habitant de la planète)¹⁴.

L'hydrogène est aujourd'hui utilisé principalement pour produire de l'ammoniac (50 %) qui sert essentiellement pour fabriquer des engrais. 31 % est utilisé en pétrochimie, notamment pour désulfurer les carburants automobiles et le reste, 19 %, sert dans la synthèse d'autres produits chimiques.

Production

Comme le montre la figure 1, l'hydrogène est produit majoritairement à partir des combustibles fossiles (gaz naturel, pétrole et charbon). L'électrolyse de l'eau ne représente que 4 % de la production. La raison est d'ordre économique. La production par électrolyse est environ 3 à 4 fois plus chère que celle qui provient des combustibles fossiles. Une des consé-

¹⁴ 1Nm³ signifie 1 m³ dans les conditions « standard » de température et de pression. Selon la norme (DIN ou ISO), la température standard est de 0°C ou de 15°C. La pression est de 1013 hectopascals (pression atmosphérique moyenne).

quences est que la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles conduit aussi à l'émission de gaz carbonique.

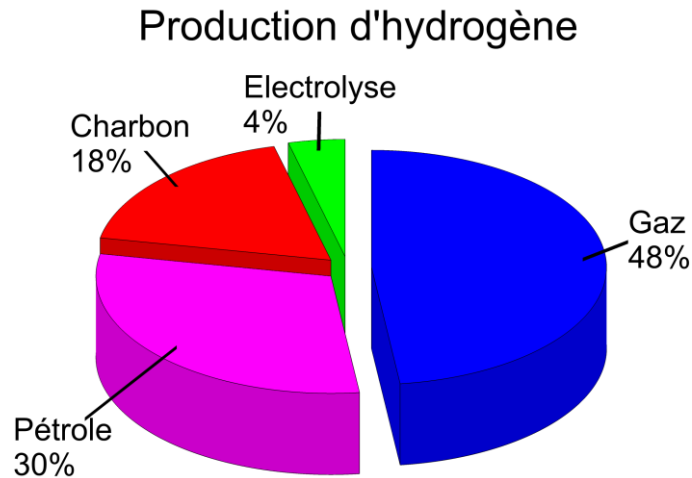


Figure 1. Production d'hydrogène suivant les sources d'énergie.

La molécule d'eau est très stable : il faut atteindre des températures d'environ 3 000 °C pour la décomposer en ses éléments. Des méthodes de production sont à l'étude pour essayer de réaliser cette décomposition. Une famille de procédés est basée sur les cycles thermochimiques qui sont un ensemble de réactions chimiques permettant de décomposer l'eau à une température moins élevée, de l'ordre de 1 000 °C. On peut obtenir ces températures avec des centrales solaires à concentration par exemple. D'autres recherches portent sur l'utilisation de micro-organismes pour décomposer la molécule d'eau en utilisant des enzymes spécifiques, comme les hydrogénases, qui ont la propriété de catalyser la décomposition de l'eau.

Transport

Les solutions pour transporter l'hydrogène sont analogues à celles du gaz naturel. On peut soit utiliser des canalisations, soit le transporter sous forme liquide.

Dans les gazoducs, l'hydrogène est transporté sous forme gazeuse à une pression comprise entre 10 et 100 bars dans des tuyaux dont le diamètre varie entre 10 et 30 cm. Par rapport au gaz naturel, la densité d'énergie transportée est plus faible : de l'ordre de trois fois inférieure. Par rapport à un oléoduc, la densité d'énergie transportée est quinze fois plus faible. Cela explique le coût élevé du transport de l'hydrogène.

Le transport cryogénique est une autre solution quand il s'agit de petites quantités. C'est l'analogue des méthaniers transportant du gaz naturel liquéfié (GNL). L'hydrogène liquide occupe en effet un volume environ 1 000 fois plus petit que lorsqu'il est gazeux à température et pression ordinaires. Mais liquéfier l'hydrogène demande beaucoup d'énergie (3,9 kWh/kg en théorie).

Stockage

Le stockage de l'hydrogène est le point faible de la chaîne énergétique car c'est un gaz peu dense. Même si la densité d'énergie par unité de masse (33,3 kWh/kg) est plus de trois fois

supérieure à celle de l'essence, la densité d'énergie par unité de volume est beaucoup plus faible, même pour l'hydrogène liquide (2,35 kWh/l contre ≈ 10 kWh/l pour l'essence).

Le moyen le plus simple de stocker l'hydrogène est sous forme comprimée, dans des bouteilles d'acier où il est comprimé à 200 bars ou à 350 bars dans des structures en fibres bobinées. Il est aussi possible de stocker de l'hydrogène à 700 bars dans des réservoirs composites. Comprimer un gaz demande de l'énergie. On s'en aperçoit lorsque l'on comprime de l'air avec une pompe à vélo en essayant de boucher l'orifice de sortie avec son doigt : la compression chauffe le gaz et une partie du travail de compression est transformée en chaleur.

Une autre manière de stocker l'hydrogène est de le liquéfier et de le conserver dans des réservoirs bien isolés thermiquement, c'est-à-dire comme dans un vase Dewar (utilisé dans les bouteilles thermos de bonne qualité). L'intérêt de l'hydrogène liquide par rapport à de l'hydrogène comprimé à 350 bars réside dans le fait que le volume occupé est environ deux fois plus faible. Il faut toutefois atteindre la température de -253 °C, ce qui est coûteux en énergie. La quantité d'énergie nécessaire à la liquéfaction est environ le tiers du contenu énergétique de l'hydrogène liquéfié. Le coût est environ quatre fois plus élevé que dans la solution où l'hydrogène est comprimé à 350 bars. L'hydrogène liquide est utilisé pour la propulsion spatiale.

Une autre manière de stocker l'hydrogène est d'utiliser des composés susceptibles de l'adsorber. Certains hydrures métalliques permettent de le faire de manière réversible. Ces composés adsorbent l'hydrogène dans certaines conditions et sont capables de le restituer lorsqu'on change les conditions de température et de pression. En général, l'hydrure adsorbe l'hydrogène à basse température et forte pression et le restitue à haute température et basse pression. Utiliser l'hydrogène stocké sous cette forme impose des contraintes pour le démarrage puisqu'il faut préchauffer l'hydrure.

L'utilisation des hydrures est intéressante pour les applications embarquées car la masse d'hydrogène contenue dans les hydrures est parfois supérieure à celle contenue dans le même volume d'hydrogène liquide. Néanmoins, ce contenu reste faible (5 à 6 % en masse).

En deux mots

L'hydrogène est sans doute un vecteur énergétique d'avenir mais il faudra qu'il soit obtenu par électrolyse de l'eau avec de l'électricité produite sans émission de gaz à effet de serre. L'utilisation d'électricité fatale, c'est-à-dire sans utilisation, provenant d'éoliennes ou de panneaux solaires peut être une solution pour faire baisser le coût de la production par électrolyse. Le point faible de l'hydrogène reste sa faible densité d'énergie par unité de volume qui fait que tout moyen de transport ou de stockage contient relativement peu d'énergie.

31. Utilisations énergétiques de l'hydrogène

Utilisation directe

L'hydrogène est pour le moment essentiellement utilisé à des fins non énergétiques (synthèse de l'ammoniac, du méthanol...) et pour le raffinage du pétrole. L'hydrogène peut aussi être utilisé directement dans un moteur à combustion interne ; des prototypes de voitures ont déjà été testés. La combustion de l'hydrogène ne produit que de l'eau mais, comme il y a aussi de l'azote dans l'air et que la combustion se fait à haute température, on obtient aussi des oxydes d'azote comme polluants.

Dans le futur, on pourrait penser utiliser de l'hydrogène liquide comme carburant dans les avions. Des essais ont été déjà effectués dans ce sens. L'eau rejetée lors de la combustion en haute atmosphère est préférable à l'émission de CO₂ car ce dernier a un impact plus important sur l'effet de serre quand il est émis à haute altitude plutôt qu'au niveau de la mer.

L'hydrogène peut aussi être utilisé, mélangé à du gaz naturel, comme combustible pour produire de la chaleur (hythane de Engie, par exemple, 80 % de gaz naturel et 20 % d'hydrogène). C'est une solution intéressante pour le stockage de l'électricité éolienne.

Piles à combustible

La batterie est le maillon faible des dispositifs électroniques nomades (téléphones ou ordinateurs portables, baladeurs MP3, etc.). Il faut la recharger fréquemment car son autonomie est limitée et sa durée de vie est souvent inférieure à celle du dispositif qu'elle alimente. La pile à combustible pourrait apporter plus de confort à l'utilisateur avec une autonomie plus grande que la batterie et la possibilité d'être rechargée en carburant.

La pile à combustible a été inventée en 1839 par le Britannique Sir William Robert Grove qui a réalisé le premier dispositif fonctionnant avec de l'hydrogène et de l'oxygène. Ce dispositif permet de réaliser l'inverse de l'électrolyse de l'eau, processus au cours duquel la molécule d'eau est décomposée en hydrogène et oxygène grâce au courant électrique. La pile à combustible utilise ainsi l'hydrogène pour produire de l'électricité et de la chaleur. Elle ne produit que de l'eau lors de son fonctionnement et elle est silencieuse (hormis les dispositifs annexes).

Une pile à combustible est constituée de trois éléments : deux électrodes et un électrolyte. Dans la configuration la plus simple, utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène (air), l'hydrogène se transforme en ion H⁺ à l'une des électrodes (anode) et libère un électron (figure 1). L'ion H⁺ est transporté dans l'électrolyte qui a la particularité de pouvoir transporter les ions mais d'être étanche aux électrons. Lorsque l'ion H⁺ parvient à l'autre électrode (cathode), avec un atome d'oxygène et un électron provenant du circuit extérieur, il donne une molécule d'eau.

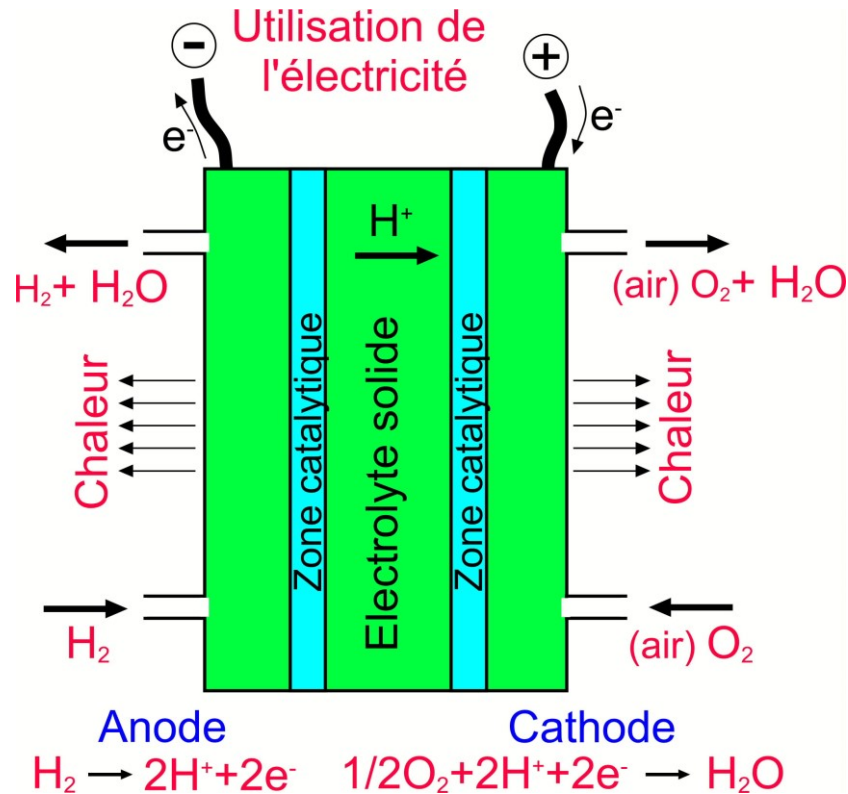


Figure 2. Schéma de principe d'une pile à combustible utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène.

Transports et piles à combustibles

La PEMFC (*polymer electrolyte membrane fuel cell*) est une technologie de pile à combustible développée pour les transports routiers. De nombreux constructeurs automobiles ont développé des prototypes de véhicules à pile à combustible et certains, comme Toyota, commencent à en vendre (la MIRAI, récemment commercialisée au Japon). Ces véhicules sont hybrides car ils doivent aussi avoir une batterie ou des supercondensateurs pour pouvoir fournir à la voiture des pics de puissance lors d'accélération importantes. Ce n'est pas possible avec la pile à combustible seule car il faudrait fortement et rapidement augmenter l'admission des gaz.

La pile à combustible se heurte néanmoins à de nombreux problèmes pour être diffusée à grande échelle dans les transports routiers. Le prix est encore trop élevé et les stations d'approvisionnement en hydrogène sont très rares (pour le moment il n'y en a que quelques-unes en France). Il reste des problèmes à résoudre comme celui du catalyseur qui est pour le moment du platine. Pour le parc mondial actuel de voitures, si toutes les voitures utilisaient une pile à combustible, la demande serait presque 300 fois supérieure à la production annuelle de platine. Des recherches sont en cours pour trouver un catalyseur qui soit un métal plus courant dans la nature et quelques résultats prometteurs ont été obtenus. L'évacuation de la chaleur est aussi un problème. Même si le rendement de la pile est de l'ordre de 50 %, il reste une grande quantité de chaleur à évacuer. La pile fonctionnant aux alentours d'une centaine de degrés, c'est beaucoup plus difficile qu'avec un moteur à combustion interne où les gaz d'échappement sont à plus haute température. Il faut un échangeur de chaleur occupant beaucoup de place dans le véhicule.

Applications prometteuses

Les premières applications à grande échelle concerneront très certainement les appareils portables comme les ordinateurs ou les téléphones. En effet, pour ces objets, la contrainte de prix n'est pas aussi forte que pour des véhicules et ils évoluent dans des conditions environnementales plus confortables que les voitures.

Les piles à combustible de type SOFC (*solid oxide fuel cell*) fonctionnent à haute température (environ 800-100 °C). Elles ont l'avantage de ne pas avoir besoin de catalyseur. Elles peuvent ainsi **réformer** du gaz naturel, ce qui permet d'utiliser le réseau actuel. Leur intérêt serait d'alimenter en chaleur et en électricité (cogénération) un ensemble de logements comme un immeuble. On pourra donc utiliser au départ le gaz naturel, puis un mélange de gaz naturel et d'hydrogène et enfin d'hydrogène pur lorsque celui-ci sera disponible en grande quantité. Le réseau de gaz naturel existant servira à le transporter sur le lieu d'utilisation.

La figure 2 résume les différentes technologies de piles à combustibles développées.

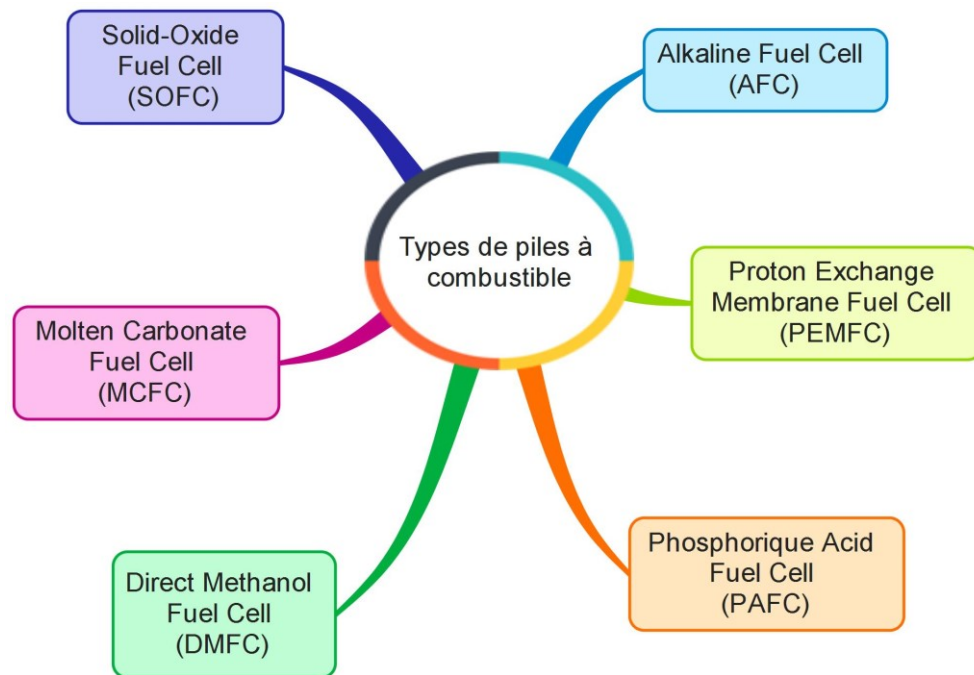


Figure 3. Principaux types de piles à combustible. Leur nom est donné en anglais car on rencontre le plus souvent leurs abréviations anglaises.

L'hydrogène sera très utile dans le futur pour les biocarburants de deuxième génération car il permettra d'utiliser tout le carbone présent dans la biomasse. Il est aussi utile dans la pétrochimie pour traiter les pétroles non conventionnels. Il pourra enfin permettre de stocker l'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes comme l'éolien par exemple.

En deux mots

L'hydrogène va très certainement jouer un rôle important dans le futur. Il faut le produire sans émission de gaz à effet de serre, donc par électrolyse de l'eau en utilisant les énergies renouvelables et le nucléaire. Nous aurons de plus en plus besoin d'hydrogène pour valoriser

les pétroles non conventionnels et pour utiliser tout le carbone contenu dans la biomasse. Il est en revanche moins intéressant comme carburant pour les véhicules, car un réservoir ne peut contenir qu'une très faible masse d'hydrogène. Il vaut sans doute mieux utiliser l'hydrogène pour fabriquer des carburants liquides comme du pétrole synthétique.

32. L'hydrogène naturel

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers (92,8 % des atomes existants). Il y en a aussi beaucoup dans le Système solaire (91 %) mais peu sur la terre (0,9 %). Le corps humain est néanmoins constitué de 10,1 % d'atomes d'hydrogène. Sur notre planète, les atomes d'hydrogène se trouvent majoritairement sous forme de molécule d'eau. Cette dernière ne représente environ que le millième de la masse de la terre ce qui correspond toutefois à environ 100 milliards de milliards de litres d'eau. On trouve aussi des atomes d'hydrogène dans les molécules organiques comme le pétrole ou le gaz naturel, par exemple.

L'hydrogène dont nous avons parlé dans la fiche précédente et qui peut être utilisé comme source d'énergie est en fait la molécule d'hydrogène ou dihydrogène, H_2 . Elle peut être fabriquée à partir du gaz naturel (méthane) ce qui est le moyen le plus économique, ou par électrolyse de l'eau ce qui peut être intéressant lorsque l'on a de l'électricité en surplus à un moment donné, donc à coût pratiquement nul. En effet, le coût de production de l'hydrogène par vaporeformage du gaz naturel est de l'ordre de 1,50 €/kg ce qui est environ trois fois plus cher que le gaz naturel. La production d'hydrogène par électrolyse est de l'ordre de 6 €/kg, soit quatre fois plus cher. Ceci explique que 96 % de l'hydrogène est produit au niveau mondial à partir des combustibles fossiles. Toutefois, la synthèse d'une tonne d' H_2 à partir du gaz naturel conduit à l'émission de 10 tonnes de CO_2 .

La concentration de molécules d'hydrogène dans l'atmosphère est très faible (0,55 ppm) et, comme elles sont très légères, certaines s'échappent de l'atmosphère terrestre et se perdent dans l'espace. Bien que ce sujet soit rarement abordé, il existe des sources naturelles d'hydrogène moléculaire au fond des océans ou sur les continents. Dans les océans, l'hydrogène se forme lors de l'interaction de l'eau avec le manteau terrestre qui affleure dans les régions où les plaques océaniques s'écartent progressivement. Sur terre, l'hydrogène peut se former dans les régions où des montagnes sont en formation.

L'hydrogène naturel dans l'océan

On observe des émissions de dihydrogène naturel dans les sources hydrothermales océaniques, notamment au niveau des dorsales. Ce phénomène est connu depuis 20-30 ans. Les fluides hydrothermaux ont pour origine le manteau terrestre¹⁵. Ils contiennent de fortes concentrations d' H_2 et de faibles concentrations d' H_2S . En effet, dans certaines régions sous-marines, il y a des failles résultant du décalage de deux plaques permettant à la péridotite d'accéder au plancher océanique. Lorsque l'eau de mer atteint la péridotite, qui est formée essentiellement d'olivine mais contient aussi de pyroxène (silicates de fer et de magnésium), elle réagit avec pour former de la serpentinite (par le processus de serpentinisation) qui est un silicate magnésien riche en eau. Il se forme aussi de la magnétite (oxyde de fer, Fe_3O_4), de la brucite (oxyde hydraté de magnésium pouvant contenir des atomes de fer) et de

¹⁵ Le manteau terrestre représente environ 70% de la masse de la terre. Il a une épaisseur de 2 900 km et se situe entre la croûte (Environ 6 km d'épaisseur ou moins) et le noyau terrestre. Les premiers 400 km sont constitués de péridotite qui est un assemblage de minéraux contenant surtout de l'olivine qui est un silicate contenant des atomes de magnésium et de fer.

l'hydrogène. La serpentinisation est une réaction exothermique (250 J/kg) et la serpentinite est moins dense (2,6 kg/l) que la péridotite (3,3 kg/l).

Le long des dorsales médio-océaniques, dont la longueur est d'environ 60 000 km, il y a un dégagement gazeux contenant de dihydrogène à une concentration qui peut être de 50 à 70 %. Le flux de chaque événement est de l'ordre de 5-10 millions de m³ d'hydrogène par an. Il y a certainement des centaines de milliers de sources mais cet hydrogène naturel est trop dispersé pour pouvoir être exploité industriellement avec les technologies actuelles. Outre l'hydrogène, le gaz émis dans les événements contient du méthane et de l'azote.

L'hydrogène naturel sur les continents

En 2008, des scientifiques Russes ont contacté des scientifiques français de l'IFPEN en leur indiquant qu'il existait des structures circulaires d'environ 1 à 2 km de diamètre d'où s'échappaient des flux importants d'hydrogène. Les scientifiques français ont confirmé ces découvertes et vérifié que le gaz émis contenait majoritairement de l'hydrogène accompagné de méthane, d'azote mais aussi de faibles quantités d'hélium qui est un gaz intéressant pour l'industrie. Les zones d'émission d'hydrogène naturel se situent souvent dans les domaines intraplaques, en particulier au niveau des cratons précambriens. Il se produirait, sous les boucliers continentaux, des réactions analogues à celles qui se passent sous les dorsales océaniques. L'hydrogène produit en profondeur diffuserait dans les roches poreuses ou passerait dans les fractures avant d'atteindre des aquifères poreux et être émis en surface. Ceci se ferait souvent dans des dépressions circulaires appelées « trous de sorcières ».



Figure 1. Illustration, avec Google Maps, de « trous de sorcière » dans la région de Carolina Bays aux USA.

Au niveau industriel, de telles sources étaient déjà exploitées au Kansas, au États-Unis et au Mali. Avec des photos issues de Google Earth, on peut repérer ces dépressions circulaires parfois qualifiées de ronds de sorcières. Il y a beaucoup d'endroits dans le monde où de l'hydrogène naturel est émis, notamment en Russie, au Kansas, en Caroline du nord, Mali, Canada, Pologne, etc. La composition du gaz varie d'une source à l'autre. Au Kansas (source Wilson) par exemple, l'hydrogène représente moins du quart du gaz émis alors qu'à Copper Cliff, au Canada, la proportion d'hydrogène est un peu supérieure à 50 %. Dans tous les cas le mélange gazeux est constitué d'hydrogène, de méthane, d'azote et d'un peu d'hélium.

En deux mots

La mise en évidence de sources notables d'hydrogène naturel est un résultat intéressant. Il fait passer l'hydrogène du statut de vecteur énergétique nécessitant de l'énergie pour le produire, à celui de source d'énergie. C'est une ressource renouvelable. Des recherches sont nécessaires pour cartographier de manière aussi complète que possible les sources d'hydrogène naturel que l'on pourrait potentiellement exploiter. Il est aussi nécessaire de développer des technologies permettant d'exploiter au mieux ces sources d'hydrogène naturel. Néanmoins, les quantités que l'on pourra récupérer seront loin de couvrir les besoins énergétiques mondiaux mais leur apport peut être intéressant.

33. Ressources minérales et énergie

On évoque souvent le fait que les combustibles fossiles sont en quantité finie sur la terre et qu'ils ne se renouvellent pas au rythme auquel nous les consommons. Par conséquent, ils deviendront rares et chers dans un laps de temps qui peut varier de quelques décennies à plusieurs siècles selon le combustible fossile considéré. Si c'est une inquiétude pour notre civilisation, ce n'est pas la seule. En effet, pour récupérer ou produire de l'énergie, pour la transformer et l'utiliser, il faut des systèmes qui sont fabriqués avec des matériaux qui consomment des ressources minérales. On a besoin d'acier, de cuivre, de silicium, etc. Alors que les combustibles fossiles disparaissent lorsqu'on les fait brûler et donnent du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, les atomes des ressources minérales ne disparaissent pas (rien ne se perd, rien ne se crée). Toutefois, ils peuvent être dispersés dans l'environnement et ne plus être récupérables techniquement et économiquement. C'est donc comme s'ils avaient disparu. Les technologies développées aujourd'hui sont très gourmandes en ressources minérales et il n'est pas sûr, dans le futur, que l'on en ait suffisamment pour toutes les applications¹⁶. Ainsi, comme nous l'avons souligné dans un précédent chapitre, si toutes les voitures du monde étaient propulsées par une pile à combustible alimentée en hydrogène, il faudrait pour fabriquer celles-ci l'équivalent de presque 300 fois la production annuelle de platine.

Des minerais de plus en plus pauvres

Pour produire, transporter et utiliser de l'énergie, on a besoin d'objets et de systèmes élaborés à partir de matériaux issus de ressources minérales comme le fer, l'aluminium, le cuivre, etc. obtenus à partir de minerais. La production de ces métaux nécessite de plus en plus d'énergie car les minerais exploités ont des concentrations de plus en plus faibles. En effet, on a exploité dans le passé les mines les plus riches et il ne reste plus aujourd'hui que celles où la teneur en métal recherché est de plus en plus faible. Ainsi, il fallait en moyenne environ 55 tonnes de minerai pour obtenir une tonne de cuivre dans les années trente alors qu'il en faut aujourd'hui 125 tonnes.

Les métaux et métalloïdes présents dans l'écorce terrestre dont l'industrie a besoin peuvent être arbitrairement classés en trois grandes familles :

- Les éléments abondants dont la concentration est arbitrairement supérieure à 1 000 ppm, soit 1 g/kg. C'est le cas du fer (56,3 g/kg), de l'aluminium (82,3 g/kg) ou du magnésium (23,3 g/kg).
- Les éléments rares dont la concentration moyenne dans l'écorce terrestre est comprise entre 0,1 et 1 000 ppm, soit 0,1 mg et 1 000 mg/kg. Dans cette catégorie, certains comme le cuivre (60 mg/kg) ou le nickel (84 g/kg) sont plus abondants que d'autres comme le molybdène (1,2 mg/kg) ou le tungstène (1,25 mg/kg). L'uranium et le thorium qui peuvent être utilisés comme combustible nucléaire ont respectivement une concentration moyenne de 2,7 et 9,6 mg/kg.

¹⁶ Voir sur ce sujet le livre de B. de Guillebon et P.Bihouix, *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*. EDP Sciences 2010

- Les éléments très rares dont la concentration est inférieure à 0,1 ppm, soit 0,1 mg/kg. C'est le cas des métaux de la mine de platine. Le platine (0,005 mg/kg), le rhénium (0,0007 mg/kg) ou l'or sont des métaux très rares, donc précieux.

La figure 1 donne la répartition moyenne des éléments métalliques et de quelques métalloïdes dans la croûte terrestre selon la classification introduite ci-dessous.

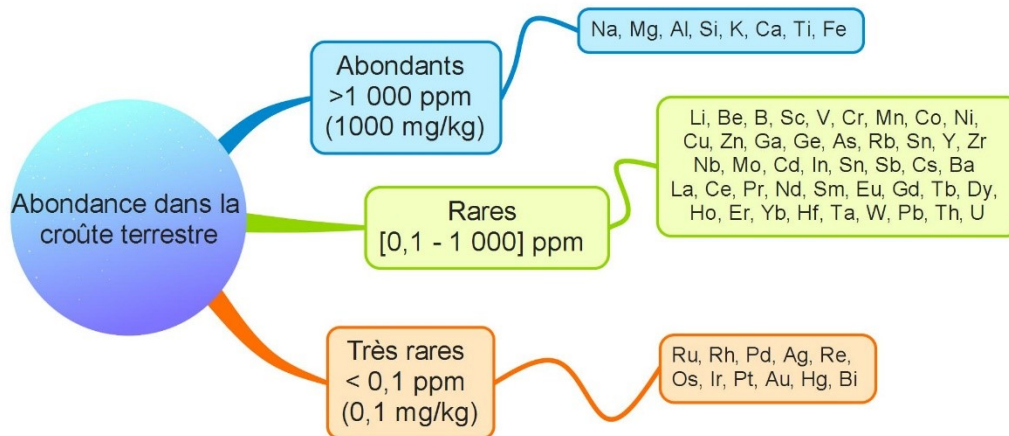


Figure 2. Abondance moyenne des métaux et métalloïdes dans la croûte terrestre. Données de www.elementschimiques.fr.

Réserves

Les réserves de beaucoup d'éléments, définies comme étant exploitables au prix actuel avec les technologies d'aujourd'hui et la consommation actuelle, sont comprises entre 30 et 60 ans. Il faut de plus en plus d'énergie pour creuser des mines et en extraire le minerai car leur teneur en métal est de plus en plus faible. Entre 8 et 10 % de l'énergie primaire consommée dans le monde est aujourd'hui consacrée à extraire et raffiner les ressources métalliques. L'exploitation des mines est aussi très polluante. De grandes quantités de déchets sont générées, des produits toxiques libérés, les eaux peuvent être polluées, etc. Elles sont souvent localisées dans des pays en voie de développement ou pas très regardant en matière d'environnement ce qui fait qu'on oublie souvent leur contribution aux déchets, à la pollution et à la dégradation de la santé.

Les réserves qui sont évaluées de cette manière sont des estimations qui évoluent dans le temps. En effet, plus l'élément devient rare plus son prix augmente ce qui conduit parfois à le substituer par d'autres éléments dans certaines applications. D'autre part, il est alors possible d'exploiter des mines qui n'étaient pas rentables précédemment. On peut aussi découvrir de nouvelles ressources.

Certains métaux (ceux que l'on appelle les « grands » métaux) sont utilisés en grande quantité dans l'industrie, le développement urbain et la motorisation. Le fer, l'aluminium, le cuivre, le zinc, le plomb, etc. appartiennent à cette catégorie. Leur consommation augmente avec le développement des pays émergents comme la Chine ou l'Inde qui les utilisent pour leurs propres besoins ou pour fabriquer des produits manufacturés pour les pays occidentaux.

D'autres métaux (les « petits » métaux) sont utilisés en petites quantités dans les alliages pour conférer des propriétés spécifiques aux grands métaux. Certains d'entre eux sont des sous-produits de l'exploitation industrielle de ces derniers. C'est le cas du gallium qui est un sous-produit de l'industrie de l'aluminium ou de l'indium qui provient de celle du zinc. En un demi-siècle, Le nombre de « petits » métaux utilisés industriellement a plus que doublé car ils sont devenus indispensables au développement des nouvelles technologies.

Les petits métaux entrent dans de multiples applications. On utilise le gallium pour fabriquer des diodes électroluminescentes utilisées de plus en plus dans l'éclairage, l'indium entre dans la fabrication des écrans plats, le néodyme est nécessaire pour fabriquer les aimants permanents des nouvelles éoliennes de forte puissance ainsi que pour les moteurs électriques des voitures hybrides ou électriques.

Des nouvelles technologies pas si vertes que ça

Les nouvelles technologies, notamment celles dédiées à la transition énergétique, utilisent de plus en plus ces petits métaux dont certains sont rares. Ils sont souvent en faible concentration dans des grands métaux ce qui rend leur récupération difficile voire impossible. Les nouvelles technologies contribuent donc à appauvrir la planète en ressources exploitables. En effet, il n'est pas possible de récupérer techniquement et économiquement des métaux présents à l'état de traces.

Les terres rares (lanthanides) sont utilisées dans beaucoup de produits de haute technologie : batteries de véhicules hybrides et électriques, écrans plats, smartphones, disques durs, etc. Elles entrent aussi dans les technologies « vertes » comme les éoliennes. La demande de lanthanides a explosé ces dernières années avec le développement de nouvelles technologies visant à être plus respectueuses de l'environnement.

La production de lanthanides est d'environ 125 millions de tonnes par an dans le monde dont 95 % sont contrôlés par la Chine. Ceci n'est pas sans poser des problèmes géopolitiques car ce pays préfère élaborer les produits finis incluant des lanthanides chez lui plutôt que d'exporter des terres rares pour lesquelles la valeur ajoutée est faible. Le plus gros gisement de terres rares se trouve en Mongolie intérieure et devrait être épuisé à l'horizon 2040.

Tout n'est pas recyclable

L'idéal est de recycler les matières premières mais ceci n'est pas toujours possible et en tout cas ce n'est jamais parfait lorsque c'est possible. Moins de 1 % des terres rares, du vanadium, du gallium ou de l'indium sont recyclés alors que le plomb est recyclé à plus de 80 %. Des métaux comme le titane sous forme métallique sont bien recyclés. Mais lorsque le titane est sous forme de TiO_2 , un matériau utilisé dans les pâtes dentifrice ou comme pigment de peinture, il ne peut pas être recyclé. Il est dispersé dans l'environnement et perdu. Or 95 % des atomes de titane entrent dans des pigments blancs, des cosmétiques ou des dentifrices. Plusieurs dérivés de métaux entrent dans la composition d'encres ou de peintures pour donner la couleur (cobalt, chrome, titane, molybdène, etc.) et sont aussi perdus après usage. Ces utilisations, où la matière première est perdue, sont des usages dits « **dispersifs** » où le recyclage n'est pas possible. En effet, il est difficile de récupérer le titane de la couche de peinture d'un mur peint en blanc.

Un élément peut n'être recyclé qu'avec dégradation d'usage. Par exemple, les pneus usagés peuvent être brûlés dans les cimenteries pour fournir de l'énergie ou être utilisés pour éla-

borer des revêtements pour le sol. Dans les deux cas il y a eu dégradation d'usage par rapport à la fonction initiale. S'ils avaient été réchappés, la fonction aurait été conservée. Dans le cas des alliages, dont l'usage est de plus en plus fréquent car ils permettent d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques, il est impossible de récupérer de manière économiquement viable les différents additifs métalliques qu'ils contiennent. De plus, le métal majoritaire ne peut pas forcément être recyclé de manière convenable à cause de ces impuretés.

Impact sur l'environnement

L'impact de l'énergie sur l'environnement dans le secteur des ressources minérales se situe dans deux domaines :

- Dans celui de la production de métaux jusqu'à l'élaboration de produits manufacturés. L'utilisation d'énergie conduit aux impacts habituels. Ils sont liés à la source d'énergie utilisée. Cela peut être des émissions de CO₂, des poussières, des pluies acides, des déchets, etc.
- Dans celui de la fabrication de matériel spécifique à l'exploitation des sources d'énergie (éoliennes, panneaux solaires, centrales nucléaires, centrales thermiques, chaudières, etc.) qui nécessite des matériaux dont l'obtention a un impact important sur l'environnement. Comme les mines et qu'une bonne partie de l'élaboration des ressources minérales est souvent faite hors du territoire national, on en néglige souvent les impacts sur l'environnement.

Le paradoxe auquel on est confronté avec les nouvelles technologies de l'énergie est qu'elles demandent des matériaux de plus en plus sophistiqués qui rendent le recyclage des métaux beaucoup plus difficile sinon impossible. Alors que leur but initial est d'aller dans le sens d'un développement plus durable, on s'aperçoit qu'elles conduisent à un plus grand gaspillage des ressources.

En deux mots

L'obtention de métaux nécessaire à la production et à l'utilisation de l'énergie devient de plus en plus énergivore. Elle a aussi un impact de plus en plus important sur l'environnement. L'extraction d'une matière première est de moins en moins accessible et nécessite de plus en plus d'énergie pour être exploitée. La production d'énergie demande aussi de plus en plus de matériaux sophistiqués et souvent plus d'énergie pour les produire à cause de leur sophistication. Ainsi, si l'on voulait fournir l'ensemble de l'électricité de la planète avec des éoliennes, certaines ressources minérales ne seraient pas en quantité suffisante, à un coût acceptable, pour construire celles-ci. Les combustibles fossiles s'épuisent et disparaissent lorsqu'on les utilise. Les matières minérales ne disparaissent pas mais elles deviennent de plus en plus difficiles à récupérer. Ceci est amplifié avec le développement des nouvelles technologies qui sont pourtant censées mieux protéger la planète.

34. Énergie nucléaire ou énergies renouvelables

« L'énergie primaire » consommée en France est 3 000 TWh/an. La consommation de ce qu'on appelle à tort « énergie finale » est de 2 000 TWh. Il y a des pertes énormes dans les centrales électriques, les moteurs, les foyers, les chaudières, etc. L'énergie réellement utilisée est d'environ 1 000 TWh/an dont 300 d'origine nucléaire, 100 d'origine renouvelable et 600 d'origine fossile.

D'ici 2050, pour une production de biens et de services augmentée probablement de 50 %, l'utilisation d'énergie sera vraisemblablement du même ordre qu'actuellement alors que l'utilisation d'origine fossile devra être divisée par au moins 2 si l'on veut réduire les émissions de CO₂.

C'est donc au moins 700 TWh qui devront provenir de l'énergie nucléaire ou des énergies renouvelables, essentiellement hydraulique, solaire et éolien. Comme l'utilisation en pratique de ces énergies est à plus de 80 % sous forme électrique, plus de 500 TWh d'électricité devront être d'origine nucléaire ou renouvelable alors qu'actuellement 300 TWh sont d'origine nucléaire, 100 d'origine renouvelable et 50 d'origine fossile.

Le choix entre nucléaire et renouvelable sera lié à leur coût, aux orientations politiques mais aussi à la solution du problème principal spécifique à chaque solution :

- L'importance de l'impact d'un accident nucléaire.
- L'intermittence des énergies solaire et éolienne.

L'énergie nucléaire

Il y a deux problèmes très différents qui concernent le futur proche et le futur lointain.

Les réacteurs actuels

Ils produisent aujourd'hui environ 400 TWh par an. Prolonger la durée d'utilisation des réacteurs utilisés en France (pour environ 300 TWh) permet une économie annuelle par rapport aux énergies renouvelables de l'ordre de 50 €/MWh x 300 millions soit 15 milliards d'euros. Ceci représente plus de 200 € par Français et par an.

La décision sur la durée de prolongation est politique, analogue au choix de conserver ou non une voiture ancienne satisfaisante mais sans les nouveaux systèmes de sécurité qui sont apparus entre-temps dans une voiture neuve. Ce qui ne veut pas dire qu'elle est dangereuse car la conduite et la maintenance sont des éléments essentiels de la sécurité.

Les réacteurs actuels seront probablement arrêtés avant 2050 ; une économie proche de 50 milliards d'euros pourrait être obtenue en toute sécurité en remplaçant leur démantèlement par le bétonnage de leur enceinte et son remblaiement comme nous l'avons décrit dans le chapitre XVII.

Les réacteurs futurs

Le coût des réacteurs de 3^{ème} génération sera plus élevé et probablement voisin du coût global des énergies renouvelables. L'avenir du nucléaire pourrait alors être lié à une réduction

de coût et à la possibilité de minimiser beaucoup l'importance de l'impact d'un accident éventuel. Or il existe une solution tout à fait fiable qui est la réalisation des réacteurs sous une couverture rocheuse d'une centaine de mètres dans une cavité semblable à celles qui sont couramment utilisées pour des centrales hydrauliques souterraines de puissance similaire. Cette solution est moins coûteuse qu'à l'air libre ; elle peut être très compétitive et permet d'utiliser des technologies bien maîtrisées que sont les réacteurs actuels de 900 et 1,300 MW moyennant quelques améliorations mineures.

Si cette solution très simple avait été choisie au lieu de la coûteuse technologie EPR, EDF et AREVA seraient aujourd'hui dans une situation florissante.

Les réacteurs nucléaires à neutrons rapides, de quatrième génération, qu'ils soient à l'uranium ou au thorium, peuvent aussi être conçus en souterrain ce qui, à faible coût, augmente la sécurité. La technique de démantèlement décrite dans le chapitre XVII rendra le nucléaire encore plus compétitif.

Les énergies renouvelables

Les solutions principales sont l'hydroélectricité (mais l'utilisation des rivières est limitée à environ 60 TWh en France), l'éolien terrestre ou offshore et le solaire photovoltaïque.

Le problème majeur de l'éolien et du solaire est l'intermittence de ces sources d'énergie. Le stockage de l'électricité ne peut être que partiel sinon on aboutirait à des solutions de stockages irréalistes à la fois du point technique mais aussi économique.

On peut évaluer que, même sans stockage d'énergie supplémentaire, il est possible de produire par exemple 500 TWh d'électricité dont environ 20 % fossiles, 10 % hydroélectrique, 50 % éolien et 20 % solaire. Il ne s'agit donc pas d'une solution entièrement renouvelable puisque les centrales à combustibles fossiles contribuent pour une part importante à la production.

Cela nécessite trois conditions dont le coût peut être facilement évalué :

- Accepter que 10 à 15 % de la production solaire ou éolien soient inutilisés lorsqu'elle est très supérieure aux besoins.
- Avoir une capacité importante d'usines thermiques utilisées moins de 1 000 heures par an.
- Augmenter le réseau électrique interrégional.

Le coût global de ces 3 sujétions majeure d'environ 20 €/MWh le coût direct des énergies renouvelables, le portant à un coût moyen de l'ordre de 100 €/MWh et probablement à terme de 80 €/MWh, c'est-à-dire proche du coût du nucléaire EPR de 3^{ème} génération.

Le stockage d'énergie n'est pas indispensable mais il est favorable si on le limite à un stockage de courte durée, de l'ordre de la journée, et non à un stockage saisonnier. La solution largement disponible en France est le stockage par pompage entre deux bassins dénivelés. Une capacité de stockage supplémentaire de 20 GW permettrait, sans surcoût important, de réduire de 20 % à 10 ou 15 % la part d'énergie fossile dans l'électricité.

Un autre inconvénient de cette solution est la visibilité d'éoliennes terrestres si l'on veut avoir 200 TWh/an en 2050. La densité d'implantation correspondante est comparable à celle qui est programmée en Allemagne pour 2030.

Il semble cependant qu'une solution essentiellement renouvelable demande probablement plus de complément thermique fossile qu'une solution très nucléaire ce qui augmentera les émissions de CO₂ alors que l'objectif est de les réduire. De plus, cela augmentera les importations de combustibles fossiles ce qui est mauvais pour la balance commerciale.

On oublie généralement les énergies marines alors que la France a le potentiel mondial le plus favorable d'énergie des marées et la meilleure expérience mondiale. Produire 50 à 100 TWh/an d'énergie marémotrice à un coût voisin de 100 €/MWh est une possibilité et les impacts divers peuvent être beaucoup plus positifs que négatifs. Une étude objective peut conduire à des résultats positifs surprenants.

On a tout intérêt à favoriser en premier lieu les énergies renouvelables « prédictives », comme l'hydraulique ou l'énergie des marées par exemple, plutôt que celles qui sont intermittentes comme l'éolien ou le photovoltaïque.

Perspectives globales

La France n'est pas confrontée à un problème de pénurie d'énergie mais à un problème de choix entre deux énergies acceptables non carbonées à prix voisin et à capacité très supérieure aux besoins. Leur association peut être intéressante, en particulier dans l'hypothèse plausible d'une augmentation de l'utilisation de l'électricité.

S'il est justifié d'économiser actuellement une énergie très carbonée et notamment d'économiser le chauffage des bâtiments, il sera probablement inutile dans trente ans de baser la conception de l'urbanisme et des transports sur l'économie d'énergie et préférable de consacrer un peu plus du produit intérieur brut à une énergie supplémentaire non carbonée correspondant aux souhaits d'une vie meilleure. La concentration urbaine n'aura plus guère de justification liée à l'énergie.

Par exemple, le principe séduisant de bâtiment à énergie positive peut être intéressant dans le futur, mais seulement si son surcoût est faible. De plus, la grande majorité des habitations produiront un excédent d'énergie aux heures creuses, donc sans valeur économique sauf si elle est stockée. L'engagement de diviser par deux d'ici 2050 « l'énergie finale » est peu significatif, irréaliste et inutile.

L'énergie mondiale

Les pays développés (Chine incluse) ont en général un climat similaire au climat français avec une part envisageable de l'éolien généralement très supérieure à celle du solaire.

Le solaire aura par contre une part essentielle dans les pays en développement, à énergie solaire régulière et économique. L'énergie nucléaire, de technicité complexe, a probablement peu d'avenir dans ces pays qui peuvent maîtriser facilement l'énergie solaire et éolienne. L'Inde peut être une exception.

35. L'acceptabilité sociale

La société a besoin d'équipements permettant de produire de l'électricité, de transporter celle-ci (lignes électriques), de stocker ou traiter des déchets résultant de cette production et utilisation, etc. Ce problème n'est pas spécifique à l'électricité et concerne toute production industrielle. Ces installations sont nécessaires pour la société et pour l'emploi mais créent des nuisances plus ou moins importantes dans leur voisinage. Lorsque l'installation est déjà installée, le problème de l'acceptabilité ne se pose que dans des cas critiques où les nuisances sont importantes pour les habitants des alentours. Par contre, on constate que les projets d'installation de tout nouvel équipement (centrale thermique ou nucléaire, barrages, éoliennes, lignes haute tension, etc.) se heurtent au problème de l'acceptabilité sociale des personnes qui vont subir des nuisances potentielles ou avérées. Dans les pays riches, cette question d'acceptabilité sociale est un problème majeur qu'on ne peut résoudre de manière rationnelle car les personnes ont la plupart du temps des attitudes irrationnelles qui sont étanches à toute forme de raisonnement. Ces attitudes sont aiguisées par les « marchands de peur » dont le fonds de commerce est d'insinuer des doutes et la peur pour toutes les technologies. Comme l'inconnu fait peur, ils n'ont pas de mal à mobiliser des personnes contre tout projet d'installation.

Où l'égalité conduit à des inégalités

La péréquation tarifaire pour l'électricité part d'un bon sentiment. Il s'agit que tous les habitants payent au même prix l'électricité quel que soit le lieu où ils habitent. On a d'ailleurs la même approche pour le courrier à l'intérieur du pays : on paye le même prix pour envoyer une lettre de Paris à Versailles ou de Paris à Marseille bien que le coût du transport soit différent. Cette égalité du prix se traduit néanmoins par une inégalité pour ceux qui se trouvent géographiquement près d'une centrale de production qui génère des nuisances réelles ou potentielles plus ou moins importantes. La conséquence de la péréquation tarifaire est que la majorité des gens susceptibles d'accueillir une centrale près de chez eux n'y voient aucun intérêt. Il faut que celle-ci soit le plus loin possible de chez eux c'est-à-dire nulle part puisque tout le monde raisonnera de la même manière. On observe les syndromes NIMBY (Not in My Back Yard, c'est-à-dire surtout pas chez moi) et BANANA (Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anything).

Il semblerait normal que les personnes proches d'une centrale bénéficient d'un tarif avantageux par rapport aux autres qui ne supportent pas ces nuisances. De plus, les pertes électriques dues au transport sont plus faibles si on achemine l'électricité sur une distance plus courte. On pourrait rétorquer que l'on cherche à acheter les gens. Il ne s'agit pas en fait de cela mais d'une compensation financière pour tenir compte d'une situation qui peut être négative sur certains aspects. Prenons pour illustrer ceci l'exemple d'appartements identiques situés dans le même immeuble mais orientés différemment. Le premier donne sur une rue passante, l'autre est à l'arrière et donne sur un parc. Tout acheteur comprendra que le prix de l'appartement le mieux situé soit plus cher que celui qui donne sur la rue. S'ils étaient au même prix et si l'acheteur avait le choix, il achèterait sans hésiter le mieux placé. Par contre, si le prix de l'appartement le moins bien placé a un prix qui est 30 % inférieur, il est possible qu'un acheteur l'achète en pensant par la suite installer des doubles vitrages pour l'isoler du bruit ou parce qu'il n'a pas les moyens d'acheter l'autre. De même, si une

personne à une petite extension dans sa maison qu'il n'utilise pas, il acceptera plutôt de la louer que de la laisser occuper à titre gracieux par n'importe qui. Dans le cas d'une centrale produisant de l'électricité on est dans une situation analogue et il est normal que les habitants des alentours en tirent avantage. En effet, il n'y a qu'une minorité de personnes qui comprendront l'intérêt public d'une installation même si elle leur amène des désagréments.

Récompenser aussi les individus

L'installation d'une centrale de production d'électricité, d'un centre de stockage de déchets nucléaires ou de toute installation industrielle a un impact sur les populations avoisinantes qui peut être plus ou moins important. Il est normal de compenser financièrement ce désagrément surtout si le nombre d'emplois créé par la nouvelle activité est faible. C'est actuellement ce qui se passe avec diverses subventions versées aux collectivités locales. L'argent récolté sert à développer des équipements utiles à la collectivité ou pour une partie de celle-ci mais cela n'a qu'un effet indirect sur les individus. Il serait normal que chaque personne profite aussi directement d'une partie de ces subventions. Elle pourrait les utiliser pour répondre à des besoins qui lui sont utiles et sur lesquels elle a un pouvoir direct de décision. Dans cette optique, on pourrait par exemple imaginer que la moitié du montant des subventions soit versée aux collectivités locales et que l'autre moitié soit distribuée aux habitants sous une forme qu'il reste à définir : réduction de la taxe d'habitation, allocation mensuelle, etc.

En deux mots

Le problème majeur des sociétés modernes vis-à-vis d'installation industrielles est plus un problème d'acceptabilité sociale que de technologie. Si l'on veut pouvoir construire plus facilement de nouvelles centrales et des équipements pour produire de l'électricité il va falloir sortir du principe de la péréquation tarifaire et donner un avantage financier concret aux personnes qui sont près de ces installations ou dans la région de ces installations.

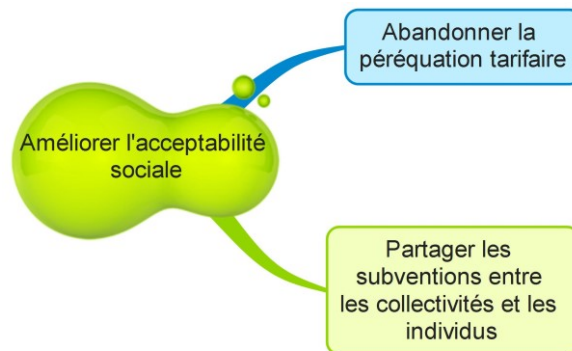


Figure 1. Deux pistes pour améliorer l'acceptabilité sociale dans le domaine de l'énergie.

Pour des installations industrielles comme celles qui vont stocker les déchets nucléaires de haute activité ou à vie longue, il faut que les habitants de la région touchent directement une partie des subventions allouées.

Ces propositions sont résumées dans le diagramme de la figure 1.

36. Remarques finales

L'énergie est une ressource précieuse indispensable pour assurer la vie des individus, leur développement harmonieux et le développement économique d'un pays. Elle a pendant longtemps été abondante et pas chère. Dans un futur plus ou moins proche, il faut s'attendre à une augmentation du prix de l'énergie car certaines ressources, comme les combustibles fossiles vont devenir plus rares, et les contraintes environnementales vont amener les sociétés à se tourner vers des sources d'énergie plus chères.

Il est nécessaire de faire des économies d'énergie et d'être plus sobre tout en conservant ou en améliorant notre niveau de vie. Si l'industrie est consciente de ceci car c'est lié à la rentabilité financière de l'entreprise, les consommateurs ont aussi un rôle important à jouer : ils consomment individuellement peu comparé à l'industrie mais ils sont nombreux ce qui fait un total considérable.

Dans le futur, on aura probablement recours à toutes les sources d'énergie. Le contexte d'utilisation et les ressources guideront le choix le mieux approprié. Il n'y a pas de source d'énergie universelle et aucune n'est à éliminer *a priori*.

Il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre et notamment celles de CO₂. Cela signifie un recours de plus en plus important aux énergies décarbonées que sont le nucléaire et les énergies renouvelables.

Il faut utiliser de plus en plus les sources de chaleur à basse température pour créer de la chaleur pour le chauffage ou du froid la climatisation. Dans ce contexte, les pompes à chaleur jouent un rôle clef. Pour les logements très bien isolés, il faudra développer des pompes à chaleur moins puissantes que celles que l'on trouve aujourd'hui sur le marché car les besoins en chauffage sont moindres que dans les logements mal isolés.

L'éolien et le photovoltaïque étant des énergies intermittentes, il faut compenser leur intermittence pour pouvoir disposer d'électricité à la demande et non quand il y a du vent ou du soleil. Il y a plusieurs moyens pour réaliser cela et il faudra une utilisation conjointe de ceux-ci avec des proportions qui dépendront de la situation :

1. On peut utiliser des centrales thermiques, à gaz naturel par exemple, pour produire de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de vent ou pas de soleil et qu'il faut satisfaire la demande. L'inconvénient est que l'on émet du CO₂.
2. On peut utiliser des moyens de stockage de l'électricité mais ceux-ci doivent être d'assez de grande capacité dans le cas d'installations centralisées.
3. Enfin, on peut s'appuyer sur un réseau intelligent qui permet de mieux utiliser l'électricité produite et introduire de nouveaux mécanismes comme l'**effacement** c'est-à-dire la possibilité pour des gros consommateurs de se passer d'électricité lorsque la demande est trop grande. C'est ce que l'on appelait dans le passé une **coupure d'électricité**. Comme souvent les gros consommateurs doivent continuer à fonctionner, cela peut aussi se traduire par le démarrage de groupes électrogènes qui sont par nature fortement émetteurs de CO₂.

Une autre possibilité, comme nous l'avons suggéré, est de surdimensionner la puissance éolienne et photovoltaïque installée et d'accepter de perdre en production lorsque la demande n'est pas assez importante et qu'il y a du soleil ou du vent.

Pour la France, il est nécessaire de réduire peu à peu la consommation de combustibles fossiles car ils représentent une grande partie du déficit commercial. Cette réduction peut se faire notamment au niveau de l'habitat et des transports.

Au niveau des transports individuels, les véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques vont prendre de plus en plus d'importance. Les véhicules hybrides rechargeables sont particulièrement intéressants car ils peuvent suffire, avec leur batterie et le moteur électrique, aux déplacements quotidiens de la plupart des personnes s'ils ont une autonomie électrique de 50 à 60 km. Contrairement aux véhicules électriques, ils peuvent aussi couvrir de grandes distances grâce à leur moteur thermique. De plus, la batterie vaut moins cher que celle d'un véhicule électrique puisque l'autonomie est plus faible.

L'intérêt des véhicules hybrides rechargeables et électriques est qu'ils peuvent constituer un stockage distribué de l'électricité. On peut surdimensionner le réseau électrique en ne produisant de l'électricité qu'avec des énergies décarbonées (nucléaire et renouvelables). Les batteries des véhicules stockent l'électricité lorsque celle-ci est excédentaire pour les autres besoins.

Il est enfin nécessaire, pour toutes les sources d'énergie, de réduire leur coût lorsque c'est possible sinon la quantité de personnes qui sont dans une situation de précarité énergétique augmentera. Ce sera également un frein important pour le développement des pays pauvres. Pour illustrer ce point, nous avons remis en avant l'idée, déjà ancienne, d'un **démantèlement *in situ*** des centrales nucléaires. Cette technique permettrait de diviser par dix le coût du démantèlement des centrales nucléaires en fin de vie et serait beaucoup plus simple que ce qui a été prévu.

On va avoir de plus en plus besoin d'électricité. D'une part pour satisfaire l'évolution des usages d'aujourd'hui, notamment ceux liés au traitement et transmission de l'information, et pour satisfaire de nouveaux usages. Parmi ceux-ci il y a le développement des pompes à chaleur qui vont permettre de produire plus de chaleur et de froid avec moins d'électricité que la plupart des moyens utilisés aujourd'hui. Il y a aussi le développement des véhicules hybrides rechargeables et électriques qui vont avoir besoin de plus en plus d'électricité pour recharger leurs batteries. Si l'on remarque que le parc automobile actuel a une puissance installée qui est une vingtaine de fois supérieure à celle du parc électrique des habitations, la demande en électricité va fortement augmenter avec le nombre de véhicules de ce type.

Les combustibles fossiles sont en quantité finie mais il en est de même des métaux qui sont nécessaires à la réalisation des systèmes énergétiques. Dans le futur on va devoir gérer la raréfaction de certains d'entre eux. Cela peut se produire à l'échelle de quelques décennies. Les nouvelles technologies de l'énergie s'avèrent ainsi peu vertueuses pour économiser des ressources minérales qui vont devenir de plus en plus rares.

On observe que la construction de nouvelles centrales, le traitement des déchets et beaucoup d'installations industrielles rencontrent des problèmes d'acceptabilité sociale qui sont plus importants que les difficultés technologiques. La péréquation tarifaire fait qu'il n'y a aucun intérêt pour une population d'avoir une centrale de production de l'électricité près de chez elle. Il nous semble nécessaire de repenser les tarifs électriques en fonction de la

proximité d'une centrale électrique. De même, les subventions attribuées aux populations proches d'une installation industrielle produisant des nuisances ne doivent pas seulement être attribuées aux collectivités locales mais aussi directement aux habitants concernés.

Pour les nouvelles technologies de l'énergie, un problème important est celui de la formation, notamment des jeunes, pour installer, maintenir et dépanner les installations associées. Il y a actuellement des insuffisances dans ce domaine qui peuvent fortement desservir ces nouvelles filières, voire les couler.

37. Bibliographie

Quelques livres

- Agator J.M., Cheron J., Ngô C. et Trap G., *Hydrogène*, Omniscience, 2007
- Alleau T. and Haessing T., *L'hydrogène, énergie du futur ?*, EDP Sciences, 2008
- Ballerini D., *Le plein de biocarburants ?* Technip 2007
- Ballerini D., *Les biocarburants*, Technip 2006
- Barré B., *Tout sur l'énergie nucléaire*, Areva, 2003
- Barré Bertrand et Bauquis P.R., *L'énergie nucléaire*, Éditions Hire
- Bastard P., Fargue D., Laurier P., Mathieu B., Nicolas M. et Roos P., *Électricité*, Eyrolles, 2000
- Bataille C. et Birraux B., *Les nouvelles technologies de l'énergie*, Rapport OPECST, 2006
- Barré B. et Bauquis P.R., *L'énergie nucléaire*, Éditions Hire, 2007
- Bauquis P.R. et Bauquis E., *Pétrole & gaz naturel*, Éditions Hire, 2004
- Bauquis P.R., *Parlons gaz de schiste en 30 questions*, La documentation Française, 2014
- Boeker E. et Van Grondelle R., *Environmental physics*, John Wiley & Sons, 1995
- Bobin J.L., Huffer E. et Nifenecker H., *L'énergie de demain, techniques, environnement, économie*, EDP Science, 2005
- Béranger B., *Les pompes à chaleur*, Eyrolles, 2008
- Bobin J.L., Nifenecker H. et Stephan C., *L'énergie dans le monde, bilan et perspectives*, EDP Sciences, 2001 et 2007
- Bonal J. et Rossetti P., *Énergies alternatives*, Omnisciences 2007
- Boucher S., *La révolution de l'hydrogène*, Le Félin Kiron, 2006
- Boyle G. (Ed.), *Renewable Energy : Power for a sustainable future*, Oxford University Press, Oxford, 2004
- Brunet S., *À qui profite le développement durable ?* Larousse, 2008
- Chevalier J.M., *Les grandes batailles de l'énergie*, Éditions Gallimard, 2004
- Da Rosa A.V., *Fundamentals of renewable energy processes*, Elsevier Academic Press, 2005
- Dautray R., *Quelles énergies pour demain ?* Odile Jacob, 2004
- Debeir J.C., Deléage J.P. et Hémerly D., *Une histoire de l'énergie*, Flammarion, 2013
- Delalande A., *Tout savoir (ou presque) sur l'énergie*, PYC Livres, 2000
- Durand B., *Energie et environnement*, EDP sciences, 2007
- Davis S.C. et Diegel S.W. *Transportation data book*, Edition 26 Oak Ridge, 2007
- Fanch J., *Energy in the 21st Century*, World Scientific, 2005
- Favennec J.P., *Géopolitique de l'énergie*, Technip, 2007
- Fay J.A. et Golomb D.S., *Energy and the environment*, Oxford University Press, 2002
- Foos J., *Manuel de radioactivité*, Formascience, 1994
- Gladstone S. *Nuclear reactor engineering*, D.Von Nostrand Company, 1963
- Hladik J., *Les énergies renouvelables aujourd'hui et demain*, Ellipses, 2011
- Hansen J.P. et Percebois J. *Énergie, économie et politiques*, de Boeck, 2011
- Hermans J., *Energy, survival guide*, Leiden University Press, 2011
- Jancovici J.M. et Grandjean A., *Le plein s'il vous plait !* Seuil, 2006
- Jouzel J. et Debroise A., *Le climat : jeu dangereux*, Dunod, 2007
- Kruger P., *Alternative energy sources*, Wiley, 2006
- Labouret A. et Viloz M., *Énergie solaire photovoltaïque*, Dunod, 2005

- Lambert G., Chappellaz J., Foucher J.P. et Ramstein G., *Le méthane et le destin de la terre*, EDP Sciences, 2006
- Lhomme J.C., *Les énergies renouvelables, Systèmes solaires*, 2008
- MacKay D., *Sustainable energy without the hot air*, UIT Cambridge Ltd., 2009
- Mathis P., *L'énergie moteur du progrès*, Éditions Quæ, 2014
- Mathis P., *La biomasse, énergie d'avenir ?* Éditions Quæ, 2013
- Mérenne-Schoumaker B., *Géographie de l'énergie*, Nathan, 1993
- Meunier F. et Meunier-Casterlain C., *Adieu pétrole...*, Dunod, 2006
- Nelson J., *The Physics of Solar Cell*, Imperial College Press, London, 2003
- Niele F., *Energy, engine of evolution*, Elsevier, 2005
- Nifenecker H., *Le nucléaire : un choix raisonnable ?*, EDP Sciences, 2013
- Ngô C., *L'énergie, ressources, technologies et environnement*, Dunod, 2002 et 2008
- Ngô C., *Quelles énergies pour demain ? On se bouge !*, Spécifiques éditions, 2007
- Ngô et J.Natowitz, *Our energy future*, Wiley, 2009, nouvelle édition 2016
- Ngô et A.Régent, *Déchets, effluents et pollution*, Dunod, 2004 et 2008
- Ngô, *On a tous besoin d'énergie*, eBook Kindle, AMAZON, 2016
- Odru P., *Le stockage de l'énergie*, DUNOD, 2010
- Oliva J.P., *L'isolation écologique*, Terre vivante, 2008
- Patel, M.R., *Wind and Solar power systems*, CRC Press, 1999
- Petit M., *Climat, le temps d'agir*, Cherche Midi, 2015
- Petrangeli G., *Nuclear safety*, British Library, 2006
- Prévot H., *Trop de pétrole !* Seuil, 2007
- Prévot H., *Avec le nucléaire*, Seuil, 2012
- Rebut P.H., *the energy of stars. Controlled nuclear fusion*, Odile Jacob, 1999
- Rojey A., *L'avenir en question*, Armand Colin, 2011
- Roux, D., *Comment faire rimer habitable et durable ? On se bouge !*, Spécifiques éditions, 2008
- Safa H., *Le nucléaire, quel intérêt pour la planète ? On se bouge !*, Spécifiques éditions, 2008
- Salomon T. et Bedel S., *La maison des négawatts*, Terre Vivante, 2002
- Sheperd W. et Sheperd D.W., *Energy studies*, Imperial College Press 2003
- Smil V., *Energies*, The MIT Press, 1998
- Smil V., *Energy at the crossroads*, The MIT Press, 2003
- Smil V., *Energy in nature and society*, The MIT Press, 2008
- Le Treut H. et Jancovici J.M., *L'effet de serre*, Dominos, Flammarion, 2001
- Turner W.C., *Energy management Handbook*, 2004
- Turpin L., *Le climat change et nous ? On se bouge !*, Spécifiques éditions, 2007
- Vernier J., *Les énergies renouvelables*, PUF, *Que sais-je ?*, 1997
- Weisse J., *Fusion nucléaire*, PUF, *Collection que sais-je*, 2003
- Wiesenfeld B., *L'atome écologique*, EDP Sciences, 1998

Begnin energy? The environmental implications of renewables, IEA-OECD publication, 1998

Capter et stocker le CO2 dans le sous-sol, Les enjeux des géosciences, 2007

Carbon and sequestration, integrating technology, monitoring and regulation, Édité par E.J.Wilson et D.Gerard, Blackwell publishing, 2007

Hybrid and electric vehicles, IEA, 2008

ICAO environmental Report 2007. www.icao.int

IEA statistics, Electricity 2006

La recherche scientifique et technique dans le domaine de l'énergie, Rapport CADAS, 1997

L'énergie, chiffres clés, DGEMP, édition 2007

L'énergie du vent, sous la direction de P.Rocher, Le cherche midi, 2007

L'énergie nucléaire en 110 questions, DGEMP

L'énergie, les entretiens de La Villette, 1994

Le nucléaire expliqué par des physiciens, sous la direction de P.Bonche, EDP Sciences, 2002

Memento de l'énergie, CEA 2006

Multiyear program plan 2007-2012, office of the biomass program, report DOE 2005

Nouvelles technologies de l'énergie, sous la direction de J.C.Sabonnadière, Lavoisier 2007

Renewable energy, power for a sustainable future, edited by G.Boyle, Oxford University press, 2004

The future of nuclear power, an interdisciplinary MIT study, MIT, 2003

The Shanghai 2004 Report, Challenge Bibendum, Michelin

Transports et émission de CO₂, Conférence Européenne des ministres des transports, OCDE 2007

World energy outlook 2006, International energy agency

Quelques sites internet

<http://photovoltaics.sandia.gov/>

<http://sequestration.mit.edu/>

www.ademe.fr

www.areva.com

www.benwiens.com

<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>

www.brgm.fr

www.cdfa.fr

www.cea.fr

www.edf.fr

www.edmonium.fr

www.eea.europa.eu

www.eere.energy.gov

www.eia.doe.gov

www.electricitystorage.org

www.energy.gov

www.eusustel.be

www.engie.com

www.h2data.de

www.heatpumpcentre.org

www.hydrocoop.org

www.iea.org

www.ifpenergiesnouvelles.fr

www.ifremer.fr

www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm

www.ipcc.ch

www.laradioactivite.com

www.nei.org

www.nma.org

www.sfen.org

www.techniques-ingenieur.fr

www.wikipedia.com

www.windpower.org

www.worldenergy.org

www.world-nuclear.org/

38. À propos des auteurs

François Lempérière

Ancien élève de l'École Polytechnique et de l'École Nationale des Pont et Chaussées. Il a participé comme entrepreneur responsable et/ou projeteur à :

- Une quinzaine de grands barrages ou usines hydroélectriques, notamment sur le Rhône, le Rhin, le Nil et le Zambèze.
- Des ouvrages maritimes importants : Grandes Forme pour Paquebots de Saint Nazaire. Port pétrolier du Havre Antifer, port de Jeddah (Arabie).
- La centrale nucléaire prototype de 500 MW d'EDF 3.
- De nombreuses études d'usines marémotrices et de Station de Stockage d'Énergie par pompage.

Il a présidé deux Comités Techniques de la Commission Internationale des Grands Barrages sur la Technologie de construction et le coût des Barrages. Il préside depuis vingt ans l'Association internationale Hydrocoop sur les Barrages et sur l'Énergie.

Christian Ngô

Ancien élève de l'École Normale Supérieure de Saint-Cloud, Agrégé de l'Université, Docteur ès Sciences.

Après une vingtaine d'années en recherche fondamentale à l'université d'Orsay puis au CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives) dans le domaine de la physique nucléaire des ions lourds, il s'est orienté vers la physique appliquée. Après avoir occupé plusieurs postes de direction au sein du CEA et avoir été Délégué Général de l'Association ECRIN, il a créé la SARL Edmonium (www.edmonium.fr).

Christian Ngô est auteur ou coauteur de 14 livres dans différents domaines (physique quantique, physique statistique, semi-conducteurs, énergie, soleil, déchets, hydrogène, physique nucléaire, nanotechnologies). Entre autres, il a aussi participé, comme expert, à plusieurs études de l'OPECST (Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques).

Achévé en janvier 2017

ISBN 978-2-9556035-1-2

EAN 9782955603512