

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER – BISKRA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE



Énergies et Environnements

Par Mohamed BOUMEHRAZ

Année Universitaire 2014–2015

Table des matières

1	Introduction	1
2	Les Ressources d'Énergie Non Renouvelable	3
2.1	Introduction	3
2.2	Énergie primaire	4
2.2.1	Les formes d'énergies primaires	5
2.3	Énergie finale	6
2.4	Les Sources Non renouvelables	7
2.5	Les Sources Fossiles	7
2.5.1	Conventionnels	7
2.5.2	Non conventionnels	8
2.5.3	Le pétrole	8
2.5.4	Le charbon	11
2.5.5	Le gaz naturel	14
2.6	Énergie Nucléaire	19
2.6.1	La fission nucléaire	20
2.6.2	La fusion nucléaire	25
3	Les Ressources d'Énergie Renouvelable	33
3.1	Introduction	33
3.2	Énergie solaire	34
3.2.1	Énergie solaire thermique	34
3.2.2	Énergie solaire photovoltaïque	35
3.3	Énergie éolienne	35
3.3.1	Énergie hydraulique	39
3.3.2	Énergie marine	40
3.4	Énergie géothermique	41
3.4.1	Types de géothermie	41
3.4.2	Principes	42

3.5	Biomasse	43
4	Stockage de l'Énergie	45
4.1	Introduction	45
4.2	Ajustement production d'énergie – demande d'énergie	48
4.3	Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie	48
4.4	Les grandes formes de stockage	49
4.5	Stockage du gaz	50
4.5.1	Le stockage aérien	50
4.5.2	Le stockage souterrain	51
4.6	Stockage d'électricité	53
4.6.1	Système de Transfert d'Énergie par Pompage – STEP	53
4.6.2	Stockage par air comprimé – CAES	54
4.6.3	Vecteur hydrogène	56
4.6.4	Les volants d'inertie	56
4.6.5	Les batteries	57
4.6.6	Le stockage électromagnétique	59
4.7	Stockage de la chaleur	60
4.7.1	Le stockage par chaleur sensible	60
4.7.2	Le stockage de chaleur par changement de phase	61
4.7.3	Le stockage de chaleur par réaction chimique	61
5	Consommations, Réserves et Évolutions des Ressources d'Énergie	63
5.1	Introduction	63
5.2	Le défi énergétique	66
6	Détection et Traitement des Polluants et des Déchets	67
7	Impact des Pollutions sur la Santé et l'Environnement	69
	Bibliographie	71
	Index	71

Table des figures

2.1	Exemple de fission nucléaire	21
2.2	Principe de la fusion nucléaire	28
2.3	Schéma du principe du Tokamak	30
2.4	Tokamak EAST	30
4.1	Système de Transfert d'Énergie par Pompage – STEP	54
4.2	Station de transfert d'énergie par pompage	55
4.3	Stockage par air comprimé – CAES	55
4.4	Production et stockage de l'hydrogène	56
4.5	Stockage par volants d'inertie	57
4.6	Stockage par par chaleur sensible	60
4.7	Le stockage de chaleur par changement de phase	61
5.1	Répartition de la Consommation de l'énergie	64

Chapitre 1

Introduction

L'énergie est indispensable au développement économique. Les civilisations modernes se sont développées depuis environ deux siècles grâce aux combustibles fossiles qui ont permis de disposer de sources d'énergie concentrées et peu chères. Ils couvrent environ 80 % des besoins énergétiques mondiaux mais sont en quantité finie. De plus, l'utilisation des combustibles fossiles rejette du gaz carbonique ce qui augmente l'effet de serre. Le défi énergétique auquel l'humanité est confrontée aujourd'hui dans le domaine énergétique est de réduire les émissions de CO₂ et, progressivement, de substituer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie n'émettant pas de CO₂ (dites décarbonées). Pour répondre à ce défi, il faut faire des économies d'énergie, utiliser des dispositifs plus efficaces et utiliser à grande échelle des sources d'énergies décarbonées (renouvelables et nucléaire). Les principaux usages de l'énergie sont, par ordre de consommation décroissante, la production d'énergie thermique, les transports et l'électricité. L'électricité est produite, au niveau mondial, majoritairement avec du charbon mais ce vecteur énergétique peut néanmoins être généré pratiquement à partir de toutes les sources d'énergie, notamment les sources décarbonées. En revanche, les transports dépendent presque entièrement du pétrole. Pour ce qui est de la chaleur ou du froid, on pourrait, dans le principe, se passer dans le futur de combustibles fossiles.

Le stockage de l'énergie est le point faible de la filière énergétique et de gros progrès restent à faire dans ce domaine qui est notamment essentiel pour exploiter les sources d'énergie intermittentes. L'habitat et les transports consomment une bonne part de l'énergie mondiale. Des gains importants en matière d'énergie sont possibles dans l'habitat. Par contre, pour les transports, le problème est plus difficile. L'hydrogène, vecteur énergétique sur lequel beaucoup pariaient à court terme pour les transports, sera surtout utile pour fabriquer des carburants liquides et pour la pétrochimie. Il faut aussi noter que la quantité d'énergie que peut délivrer une source n'est pas le seul paramètre important et que l'on a parfois aussi besoin de grandes puissances dans certaines applications industrielles, fortes

puissances continues que beaucoup de sources renouvelables sont incapables de fournir.

L'énergie est indispensable au développement économique de l'humanité et à l'élévation du niveau de vie des êtres humains. Cette énergie est principalement consommée sous forme thermique (chaleur ou froid), pour les transports ou pour produire de l'électricité utilisée dans de multiples applications de la vie courante. La nourriture est aussi une forme d'énergie mais elle n'est pas comptabilisée dans les bilans énergétiques. C'était la source principale d'énergie de l'homme primitif dont l'alimentation était beaucoup plus pauvre que celle que nous avons aujourd'hui dans les pays développés. Le contenu énergétique de la nourriture ne représente plus aujourd'hui que de l'ordre de 5 % de l'énergie consommée au niveau mondial.

On réalise l'importance de l'énergie dans la civilisation moderne lorsque l'on en est privé : panne d'électricité générale dans une maison ou un immeuble, absence de transports en commun à cause d'une grève, s'il faut monter 10 étages à pieds lorsque l'ascenseur est en panne, lorsqu'il n'y a pas de chauffage dans un logement par temps froid, etc. Le consommateur des pays riches a, aujourd'hui, pris l'habitude d'avoir de l'énergie quand il le veut et de plus en plus où il le veut avec les équipements nomades. Cette situation est néanmoins récente et vient du fait que nous disposons de sources d'énergie abondantes depuis près de deux siècles dont la majeure partie vient des combustibles fossiles. Actuellement, avec 10 centimes d'euros, on peut acheter assez d'énergie (sous forme d'électricité ou de pétrole) pour produire plus de travail mécanique que ne peut en fournir un travailleur manuel dans une journée.

Accéder à l'énergie a permis de faire des progrès dans de nombreux domaines. Cela s'est traduit par une augmentation considérable de l'espérance de vie depuis un peu plus de 200 ans. Les habitants des pays qui n'ont aujourd'hui pas accès à l'énergie ont malheureusement une espérance de vie bien inférieure à celle des pays développés : elle peut être de l'ordre d'une quarantaine d'années seulement.

Chapitre 2

Les Ressources d'Énergie Non Renouvelable

2.1 Introduction

Aujourd'hui et pour les cinquante années à venir, de quelles énergies disposerons-nous? Selon toute vraisemblance, la gamme des sources d'énergie que nous pourrons utiliser restera conventionnelle avec les combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), l'énergie nucléaire (de fission) et les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse et géothermie), la fusion thermonucléaire contrôlée restant un objectif beaucoup plus lointain.

Actuellement, la consommation mondiale d'énergie requiert les combustibles fossiles à hauteur de 80%, le nucléaire pour 7% et les énergies renouvelables pour 13%.

Les énergies fossiles concourent pour 64% à la production mondiale, l'énergie nucléaire pour 17%, et les énergies renouvelables, majoritairement d'origine hydraulique, pour 19%. Avec la fluctuation des cours du gaz, la raréfaction du pétrole et l'avènement de nouvelles technologies performantes, ces équilibres évolueront nécessairement dans les cinquante prochaines années.

La population mondiale devrait atteindre 9 milliards d'habitants d'ici cinquante ans et entraînera une augmentation de la consommation d'énergie, notamment dans les pays en développement. À titre d'exemples, le parc automobile devrait passer de 400 millions à 1 milliard d'unités dès 2020; le nombre de villes de plus de 10 millions d'habitants, deux fois plus avides d'énergie que les régions rurales, doubler vraisemblablement.

Les estimations prévoient une consommation d'énergie multipliée par 1.4 d'ici à 2020. Dans ce contexte, quelle sera la place et le rôle des énergies dans l'avenir?

Les ressources renouvelables constituent un gisement extrêmement abondant; par exemple, l'ensemble de nos consommations primaires représente environ une heure de

rayonnement solaire capté par l'ensemble de la planète. Une partie très largement suffisante pour satisfaire les besoins de l'ensemble de l'humanité est aisément accessible avec des perspectives de durabilité sans commune mesure avec nos ressources actuelles (qui sont à plus de 80 % d'origine non renouvelable). Cependant, les ressources renouvelables ont deux spécificités qui perturbent nos habitudes:

- d'une part, elles sont peu concentrées (ou encore dispersées) et nécessitent généralement des infrastructures de conversion à plus petite échelle;
- d'autre part, la majeure partie de ces ressources est fluctuante, ce qui requiert des changements importants notamment dans les systèmes de conversion qui doivent alors intégrer du stockage, mais également dans la façon de consommer.

2.2 Énergie primaire

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être utilisable et transportable facilement. Dans l'industrie de l'énergie, on distingue la production d'énergie primaire, de son stockage et son transport sous la forme d'énergie secondaire, et de la consommation d'énergie finale. L'énergie primaire permet de produire de l'énergie secondaire qui est elle-même transformée en énergie finale au stade de l'utilisation. Ainsi l'énergie mécanique d'une chute d'eau, transformée en énergie électrique, puis transportée sous cette forme peut produire chez l'utilisateur: froid, lumière, énergie mécanique, chauffage,... Vu de l'utilisateur, les formes d'énergie primaires sont souvent substituables tant qu'elles lui permettent d'utiliser l'énergie finale de son choix.

Cette série de transformations forme une chaîne énergétique, par exemple la chaîne pétrolière: extraction, transport, raffinage, distribution, utilisation. Les transformations sont caractérisées par un rendement, toujours inférieur à 1, par suite des pertes inévitables au cours de la production et du transport.

Dans les statistiques de comparaison de la production et de l'utilisation de l'énergie, on a l'habitude de considérer comme énergie primaire, l'énergie qui résulte de la première transformation (ainsi la chaleur nucléaire, l'électricité éolienne ou l'électricité hydraulique sont-elles considérées comme électricité primaire) et comme énergie finale la forme sous laquelle elle arrive chez l'utilisateur final (ainsi l'électricité mesurée au compteur de l'abonné quelle qu'en soit l'utilisation finale: éclairage, chauffage, machines...), parce que ce sont celles pour lesquelles on dispose de données chiffrées.

Pour permettre les comparaisons, toutes les formes d'énergie sont exprimées à l'aide d'une unité commune permettant de mesurer la quantité d'énergie contenue, émise ou

transférée; elle peut être, selon le sujet principal, le gigajoule (GJ), le mégawattheure (MWh), ou la tonne équivalent-pétrole ou tep. Comme les diverses sources de pétrole ou de houille peuvent avoir des caractéristiques énergétiques légèrement différentes, on s'appuie sur des conventions pour passer facilement d'une unité à l'autre. Par convention : 1 Wh=3600 J, 1 baril(159 l ou 140 kg)=1700 kWh, 1 BTU(British Thermal Unit)=1050 kWh, 1 tep(tonne équivalent pétrole) = 11600 kWh=41.855 GJ, (parfois arrondi à 42 GJ) = 11.628 MWh = 1 000 m³ de gaz = 7.33 barils de pétrole.

2.2.1 Les formes d'énergies primaires

Énergie humaine et animale énergie mécanique de traction animale

Énergie mécanique des éléments naturels

- Énergie hydraulique (cours d'eau et chutes d'eau) transformée en énergie mécanique (moulins à eau) ou électrique (centrale hydroélectrique).
- Énergie marémotrice (marées) transformée en énergie électrique dans des centrales marémotrices.
- Énergie éolienne (vent) transformée en énergie mécanique (moulins à vent, voiliers, char à voile) ou électrique (génératrice éolienne).

Énergie chimique Transformée en chaleur (énergie thermique) par combustion, puis en électricité.

Les combustibles Les combustibles peuvent être classés par état en combustibles solides, combustibles liquides et combustibles gazeux. À chaque état correspond certains type de stockage et de transport.

Les combustibles (charbon, pétrole et gaz naturel) ont aussi une utilisation non énergétique comme matière première dans l'industrie chimique: carbochimie, pétrochimie, engrais, le bâtiment ou les travaux publics (bitume).

Les Combustibles minéraux

- Combustibles minéraux solides: charbon, lignite, à base de carbone plus ou moins pur.
 - Hydrocarbures : gaz naturel, pétrole (molécules formées de carbone et d'hydrogène).
 - Explosifs : énergie non contrôlée.
-

Les combustibles organiques La Biomasse : bois, produits et déchets végétaux, formés de matière organique (essentiellement carbone, hydrogène et oxygène), transformés en combustibles divers: bois et dérivés, diester, méthane (biogaz), méthanol, éthanol...

Énergie nucléaire obtenue par

- Fission : la radioactivité de l'uranium et du plutonium transformée en chaleur, puis en électricité; une partie de la chaleur est perdue et rejetée dans l'air et dans l'eau. C'est la chaleur directement générée par la fission des atomes qui est considérée comme énergie primaire, ce qui explique que l'énergie électrique issue du nucléaire montre généralement un rendement de 33 % dès la production.
- Fusion : encore au stade expérimental.

Énergie solaire Rayonnement solaire, transformé en chaleur (chauffe-eau solaire, pompe à chaleur) ou en électricité (cellules photovoltaïques).

Énergie thermique terrestre Exploitée en Géothermie: exploitation de la chaleur naturelle des couches profondes de l'écorce terrestre.

2.3 Énergie finale

On utilise le terme d'énergie finale lorsque l'on considère l'énergie au stade final de la chaîne de transformations de l'énergie, c'est-à-dire au stade de son utilisation par le consommateur final. L'énergie utilisée concrètement par l'utilisateur final est le produit d'une chaîne de transformation d'énergies primaires. Par exemple, une voiture à hydrogène utilise l'hydrogène comme énergie finale, mais cet hydrogène est le plus souvent produit à l'aide d'électricité, elle-même produite à partir de chaleur issue de différents types de combustibles (charbon, gaz naturel, pétrole, uranium enrichi...). Dans ce cas, l'hydrogène est la source d'énergie finale pour le véhicule, et le charbon ou le pétrole l'énergie primaire. Dans le cas où l'hydrogène sert à produire de l'électricité (par exemple dans une pile à combustible), il devient un vecteur énergétique servant de phase intermédiaire (et éventuellement de stockage) entre l'énergie primaire ayant servi à sa production et l'énergie finale (électricité) issue de la pile à combustible.

La transformation des énergies primaires en énergie finale produit elle aussi de la pollution. Par exemple, produire de l'électricité à partir de charbon est une forte source de gaz à effet de serre. Ainsi, une voiture à hydrogène utilisant du carburant transformé à partir d'électricité hydraulique ou nucléaire est effectivement peu polluante en termes de gaz à effet de serre, alors que dans l'écrasante majorité des cas où l'électricité est produite

à partir de charbon, un tel véhicule émet plus de gaz à effet de serre, et ce du fait de la transformation des énergies primaires

Les formes d'énergie finale sont variées :

- Énergie mécanique : utilisée pour l'industrie, l'agriculture, les transports, divers usages domestiques,
- Énergie électrique : utilisée pour l'industrie (informatique), l'éclairage, la réfrigération, divers équipements domestiques...
- Énergie thermique : utilisée dans l'industrie, l'agriculture, pour le chauffage, la réfrigération, la climatisation...

2.4 Les Sources Non renouvelables

On appelle ressources énergétiques non renouvelables, celles que l'on épuise sans qu'elles ne se reconstituent. Ce sont les ressources fossiles et le minerai d'uranium.

2.5 Les Sources Fossiles

On appelle combustible fossile tous les combustibles riches en carbone – essentiellement des hydrocarbures – issus de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années, jusqu'à parfois 650 millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel. Parmi ces derniers, le méthane CH_4 présente le rapport H/C le plus élevé, tandis que l'anhracite et certaines houilles sont composés de carbone presque pur. Ces sources d'énergie ne sont pas renouvelables car elles demandent des millions d'années pour se constituer et parce qu'elles sont utilisées beaucoup plus vite que le temps nécessaire pour recréer des réserves.

Les combustibles fossiles représentaient environ 80 % des 10 078 MTep (MégaTonne équivalent pétrole), de l'énergie consommée dans le monde. Ils sont généralement classés en deux grandes catégories :

2.5.1 Conventionnels

Les combustibles fossiles conventionnels représentent la quasi-totalité de la consommation actuelle d'énergies fossiles.

- Le pétrole : environ 32.6 % de l'énergie consommée dans le monde en 2012.
 - Le charbon : environ 30.5 % de l'énergie consommée dans le monde en 2012.
 - Le gaz naturel : environ 24.0 % de l'énergie consommée dans le monde en 2012.
-

2.5.2 Non conventionnels

Parmi les combustibles fossiles non conventionnels, on peut citer :

- Les schistes bitumineux contenant du kérogène, qui doit encore être pyrolysé;
- Les sables bitumineux contenant du bitume;
- Les hydrates de méthane;
- La tourbe est un peu à part, son cycle de formation se compte en milliers d'années, ce qui la place à mi-chemin entre les carburants fossiles (dont la formation se compte en millions d'années) et les renouvelables;
- Le gaz de schiste;
- Les huiles de schiste;
- Le gaz de couche, gaz de houille, plus connu sous le nom de grisou.

2.5.3 Le pétrole

Le pétrole, en latin *petroleum* est la composition du mot grec *petra*, roche, et du mot latin *oleum*, huile) est une roche liquide d'origine naturelle, une huile minérale composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégés dans des formations géologiques particulières. L'exploitation de cette source d'énergie fossile et d'hydrocarbures est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides – fioul, gazole, kérosène, essence, GPL – tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels – plastiques, textiles synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc. – et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants. Le pétrole dans son gisement est fréquemment associé à des fractions légères qui se séparent spontanément du liquide à la pression atmosphérique, ainsi que diverses impuretés comme le dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, l'eau de formation et des traces métalliques.

Le pétrole est un combustible fossile dont la formation date d'environ 20 à 350 millions d'années. Aussi appelé *huile* ou *pétrole brut*, il provient de la décomposition d'organismes marins (principalement de plancton) accumulés dans des bassins sédimentaires, au fond des océans, des lacs et des deltas.

La transformation de la matière organique en pétrole s'échelonne sur des dizaines de millions d'années, en passant par une substance intermédiaire appelée kérogène. Le pétrole produit peut ensuite se trouver piégé dans des formations géologiques particulières, appelées *roches-réservoirs* constituant les gisements pétrolifères *conventionnels* exploités de nos jours.

La production mondiale est d'environ 90 million barils par jour, dont 34 millions pro-

viennent des pays membres de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) incluant: Algérie, Libye, Angola, Nigeria, Arabie saoudite, Émirats arabes unis, Koweït, Iran, Iraq, Qatar, Venezuela et Équateur. Certains importants pays producteurs de pétrole, dont certains sont exportateurs nets, ne sont pas membres de l'OPEP. C'est le cas du Canada, du Soudan, du Mexique, du Royaume-Uni, de la Norvège, des États-Unis, de la Russie et d'Oman.

Classifications des pétroles

Chaque gisement pétrolier recèle une qualité particulière de pétrole, déterminée par la proportion relative en molécules lourdes et légères, mais aussi par la quantité d'impuretés. Puisque tout processus de formation est unique alors un gisement de pétrole contient un mélange d'hydrocarbures qui le caractérise selon l'histoire géologique de la zone où il s'est développé.

La provenance géographique est donc un des critères de classification du pétrole (Golfe, mer du Nord, Venezuela, Nigeria, etc.). Toutefois, pour établir des comparaisons entre différents sites, d'autres critères existent. Les plus importants sont les mesures de la viscosité et de la teneur en soufre du pétrole brut. L'industrie pétrolière caractérise la qualité d'un pétrole à l'aide de sa densité API, correspondant à sa *légèreté*.

- Selon la viscosité, quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd et bitume). Plus le pétrole brut est visqueux, plus il est *lourd*.
 - Les gisements de pétrole léger: l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gazole. Les gisements sahariens présentent cette caractéristique;
 - Les gisements de pétrole moyen: la viscosité du pétrole brut est intermédiaire entre le pétrole léger et le pétrole lourd. Il s'agit par exemple des gisements du Moyen-Orient;
 - les gisements de pétrole lourd ou extra-lourd: le pétrole brut ne coule pratiquement pas à la température ambiante. Les gisements d'Amérique du sud en sont un exemple;
 - Les gisements de bitume: le pétrole brut est très visqueux voire solide à la température ambiante. Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada. Cette propriété est importante pour déterminer la rentabilité de l'exploitation. En effet, un pétrole peu visqueux ou léger est plus facile à extraire et à traiter qu'un pétrole lourd.
 - La teneur en soufre distingue le pétrole brut soit en doux (faible teneur en soufre) soit en sulfuré dans le cas contraire. Des gisements de pétrole doux sont notamment trouvés en Afrique, ceux de pétrole sulfuré en Amérique du Nord. Cette mesure est utilisée pour la phase de raffinage du pétrole, une faible teneur en soufre la
-

favorisant.

Réserves pétrolières

Les réserves pétrolières désignent le volume de pétrole récupérable, à partir de champs de pétrole découverts, sur la base des contraintes économiques et techniques actuelles. Ce volume se base sur l'estimation de la quantité de pétrole présente dans des champs déjà connus, affectée d'un coefficient minorant dépendant de notre capacité à extraire du sol ce pétrole. Ce coefficient dépend de chaque champ, il peut varier de 10 à 50 %, avec une moyenne mondiale de l'ordre de 35 % en 2009. Les réserves sont rangées dans différentes catégories, selon leur probabilité d'existence dans le sous-sol : réserves prouvées (probabilité de plus de 90 %), réserves probables (de 50 à 90 %) et réserves possibles (de 10 à 50 %). On distingue également différentes sortes de réserves en fonction du type de pétrole : pétrole conventionnel ou pétroles non conventionnels. Les pétroles non conventionnels sont essentiellement constitués des huiles extra-lourdes, des sables asphaltiques, et des schistes bitumineux. La rentabilité des gisements de pétrole non conventionnel est incertaine, car la quantité d'énergie nécessaire à leur extraction est plus importante.

Les réserves mondiales prouvées en 2013 sont évaluées à environ 1478,2 milliards de barils du pétrole conventionnel (Vénézuéla: 298 milliards barils 24,8%, Arabe Saoudite 266 milliards de barils 22,10%, Iran 157 milliards barils, 13,10%, Iraq: 140 milliards baril, 11,70%, Algérie en quinzième position avec 12 milliards barils, 0,82%) et 1532 milliards barils du pétrole non conventionnel (Arabe Saoudite 265 milliards barils, 17,27%, Venezuela 209 milliards barils, 13,66%, Canada 174 milliards barils 11,33%, Iran 151 milliards Algérie en 17 ème position avec 12 milliards barils soit 0,80%).

Impact environnemental

L'impact environnemental le plus inquiétant du pétrole est l'émission de dioxyde de carbone CO₂ résultant de sa combustion comme carburant. La combustion libère dans l'atmosphère d'autres polluants, comme le dioxyde de soufre (SO₂), mais ceux-ci peuvent être maîtrisés, notamment par la désulfuration des carburants, ou des suies. On estime cependant que si le pétrole est plus polluant que le gaz naturel, il le serait nettement moins que le charbon et les sables bitumineux. L'extraction pétrolière elle-même n'est pas sans impact sur les écosystèmes locaux même si, comme dans toute industrie, les risques peuvent être réduits par des pratiques vigilantes. Néanmoins, certaines régions fragiles sont fermées à l'exploitation du pétrole, en raison des craintes pour les écosystèmes et la biodiversité. Enfin, les fuites de pétrole et de production peuvent être parfois désastreuses, l'exemple le plus spectaculaire étant celui des marées noires. Les effets des dégazages ou même ceux plus cachés comme l'abandon des huiles usagées ne sont pas à négliger. Notons

enfin que le pétrole peut être cancérigène sous certaines formes, et que les conséquences géologiques sous forme de séismes induits sont très peu étudiées.

2.5.4 Le charbon

Couvrant en 2011, 28,8 % des besoins énergétiques mondiaux, le charbon est actuellement une des principales ressources énergétiques de l'humanité. Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de biomasse (résidus de forêts notamment) enfouie dans le sol au cours des temps géologiques. Par enfouissement, sous l'effet des pressions et des températures croissantes avec la profondeur (gravité, gradient thermique), les végétaux ensevelis sont en effet décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone: le charbon.

Les plus anciens et les plus recherchés des charbons datent de près de 300 millions d'années (ère carbonifère). Mais on trouve aussi des charbons plus récents, déposés jusque dans l'ère tertiaire (lignite) ou quaternaire (tourbe).

Les gisements de charbon se situent sous terre et sous les planchers continentaux des océans. Ils peuvent être enfouis à plusieurs kilomètres de profondeur ou affleurer à la surface du sol.

Le charbon est composé d'hydrogène, de soufre, d'oxygène et surtout de carbone. Selon la teneur en carbone, la profondeur et la température du gisement, il en existe plusieurs catégories:

- Les charbons de rangs inférieurs ont une faible teneur en carbone: le lignite est composé de 50 à 60% de carbone;
- Les sous-bitumineux sont constitués entre 60 et 70% de carbone.
- Les charbons de hauts rangs sont composés à plus de 70% de carbone et sont souvent désignés par le terme de houille:
- Les bitumineux sont composés de 70 à 90% de carbone. Ils peuvent être du charbon-vapeur, utilisé comme combustible pour produire de la vapeur, ou du charbon à coke que l'on carbonise dans un four chauffé à $1000^{\circ}C$ à l'abri de l'air. Cette carbonisation permet de produire du coke; l'anhracite a encore une qualité supérieure puisqu'il est composé à plus de 90% de carbone.

Chaque type de charbon correspond à un stade de maturité. Dans les tourbières, les végétaux se décomposent pour devenir de la tourbe (constituée à 50% de carbone); les zones boisées produisent du lignite. Puis, par enfouissement, ces dépôts carbonés se transforment progressivement en houille.

Les charbons de haut rang se forment à plus de 10 km de profondeur. A la suite des mouvements tectoniques et de l'érosion, la houille peut affleurer à la surface. Compte tenu du gradient géothermique moyen ($3^{\circ}C$ par 100 m), les mines de charbon actuellement

exploitées ne se trouvent pas à plus de trois kilomètres de profondeur.

Bien que de grandes disparités entre les pays consommateurs caractérisent son évolution, l'ère du charbon n'est pas révolue. Si l'histoire du charbon est parfois associée à l'exploitation coûteuse de mines difficiles il est largement produit à ciel ouvert à l'échelle internationale. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, le charbon pourrait devenir dès 2017 la première source d'énergie consommée dans le monde.

Le charbon fournit 38.3% de l'électricité mondiale et occupe une place prépondérante dans le bouquet énergétique de certains États:

- Aux États-Unis, environ 40% de l'électricité est encore produite à partir du charbon;
- En Chine, plus de 350 centrales à charbon sont en projet. La consommation de charbon y a plus que doublé au cours des dix dernières années.

Le charbon présente différents atouts qui expliquent sa place dans le bouquet énergétique mondial:

- ses réserves sont estimées à 112 années de production au rythme actuel;
- sa répartition équilibrée sur le globe favorise l'indépendance énergétique et la diminution des coûts de transport;
- son prix est historiquement plus bas et plus stable que celui des autres ressources fossiles;
- il renferme du gaz appelé *grisou* (aussi appelé coalbed methane en anglais) dont l'exploitation est en pleine expansion en particulier aux États-Unis.

En revanche, dans un contexte mondial de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, le charbon présente l'inconvénient d'être le combustible fossile le plus émetteur de CO₂. L'avenir du charbon est donc lié à l'évolution de techniques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des centrales et d'en capter le CO₂. Mais les avantages économiques pousseront les pays disposant de réserves importantes à les exploiter pour assurer leur développement (Chine, Inde, Indonésie, etc.).

Impact environnemental

Le charbon à l'inconvénient d'être le combustible fossile le plus polluant.

- **Au stade de l'extraction et du transport:** De premiers impacts directs et indirects existent à ce stade: Les chantiers produisent des poussières susceptibles de causer la silicose quand elles sont inhalées durant une longue période (cause fréquente de mortalité des mineurs).

Certaines mines affectent directement la faune et la flore en détruisant leur habitat (mines à ciel ouvert), crassiers ou indirectement par les pollutions directes ou indirectes ou par des modifications environnementales telles que les rabattement de nappe induits par les pompages de dénoisement des mines ou suite à l'utilisation

d'une eau de surface pour les besoins miniers (arrosage pour abattement des taux d'empoussièrément, lavage du charbon, etc.).

Selon les caractéristiques du gisement, le charbon est plus ou moins riche en éléments indésirables (soufre, métaux lourds, radionucléides) et il peut laisser se dégazer du grisou.

- **Stade de la transformation et/ou combustion:** La carbochimie quand elle est associé aux bassins charbonniers a été et reste une source importante de pollution. Elle a au XXe siècle laissé de lourdes séquelles de pollution de nappes, sols et sédiments. La combustion du charbon est également une activité particulièrement polluante, plus que pour d'autres énergies fossiles en raison de la quantité de produits indésirables que contient le charbon.

Au cours de la pyrolyse, le charbon émet de nombreux gaz et particules volatiles toxiques et polluantes: HAP, dont benzène et ses dérivés aromatiques, goudrons, dérivés du phénol comme les dioxines... Lorsque le charbon se met à brûler, il émet des oxydes de soufre et d'azote qui acidifie l'air, ainsi que des suies et d'autres éléments toxiques comme le cadmium, l'arsenic ou le mercure.

La combustion du charbon libère dans l'air des quantités importantes de soufre, qui contribue au phénomène de pluies acides et avec le CO₂ transformé en acide carbonique dans l'eau aux phénomènes d'acidification des eaux de surface et des mers.

De nombreux foyers utilisent le charbon pour le chauffage et/ou pour la cuisine, en produisant une fumée nuisible à la santé : L'OMS(Organisation Mondiale de Santé) estime que plus de 1.3 million de personnes meurent chaque année des suites de problèmes respiratoires causés par des combustibles solides (bois, herbacés, tourbe, bouses séchées et charbon).

- **Contributions au forçage climatique (par effet de serre et via les aérosols soufrés):** Le charbon est majoritairement formé de carbone. Sa combustion libère donc énormément de dioxyde de carbone CO₂ (gaz à effet de serre). En 2003, environ 25.0 GtCO₂ (milliards de tonnes équivalent-gaz carbonique) ont ainsi été émises par l'humanité dans l'air, dont 9.4 GtCO₂ pour produire de l'électricité (dont à partir du charbon pour une part de 6.6 GtCO₂), souvent sans cogénération exploitée de chaleur et/ou de vapeur. Si la tendance se poursuit; en 2030 les émissions mondiales seront accrues de 14.0 GtCO₂ (+ 56 %), et les émissions de 7.5 GtCO₂ (+80 %) avec 4.8 GtCO₂ provenant du charbon. En 2050, la situation serait pire encore avec un accroissement de 30.5 GtCO₂ (+ 300%) et 21.1 GtCO₂ en plus issus du charbon. Si les meilleures technologies actuellement disponibles pour un charbon plus *efficace* et plus propre étaient utilisées partout, l'augmentation des émissions serait dimi-

nuée de 22 % relativement au niveau attendu en 2050, et de 11 % par rapport au niveau attendu en 2030. L'espoir de technologies propres fait envisager à certains une atténuation plus importante de l'augmentation des émissions (de 9.7 GtCO₂; soit une baisse relative de 32 % par rapport au scénario *business as usual* pour 2050, et de 18 % par rapport au même scénario pour 2030).

Équiper toutes les centrales au charbon de ces technologies coûteuses et en grande partie encore hypothétiques d'ici 2030 ou 2050 semble cependant peu réaliste, et en tous cas, même un déploiement total des meilleures technologies de charbon propre disponibles ne fait que limiter l'augmentation d'émissions de CO₂. La combustion du charbon libère aussi d'autres gaz à effet de serre (NO_x en particulier).

Réserves du charbon

C'est le charbon qui a les réserves les plus importantes; 861 milliards de tonnes (États-Unis: 237 milliards de tonnes, Russie : 157.3 milliards de tonnes et Chine : 114.5 milliards de tonnes). À ce titre c'est un combustible fossile d'avenir car il sera le dernier utilisable lorsque le pétrole et le gaz seront rares. Par ailleurs, il est important de noter qu'il est et qu'il sera possible de fabriquer du pétrole à partir du charbon mais au prix d'une pollution importante. La répartition du charbon dans le monde est différente de celle des hydrocarbures et du gaz naturel. Les ressources sont inégalement réparties à l'échelle planétaire. Pour le pétrole, les 3 pays les mieux dotés possèdent 45 % des réserves mondiales totales, et les 20 premiers pays plus de 95 %. En ce qui concerne le gaz, les 20 premiers pays détiennent plus de 91 % des réserves prouvées. Finalement, environ 60 % des réserves de charbon sont détenues par 3 pays.

Les réserves sont considérables, mais leur extraction demande plus d'énergie que pour le pétrole traditionnel et génère plus de pollution.

2.5.5 Le gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile composé d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse. Avec 24.0 % de l'énergie consommée en 2012, le gaz naturel est la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole (32.6 % en 2012) et le charbon (30.5 % en 2012). Son exploitation non-conventionnelle étant récente, l'étendue de ses réserves est encore assez mal connue. En 2008, elles correspondaient à 60 ans de consommation et étaient concentrées pour 40 % au Moyen-Orient. Les spécialistes estimaient alors que la Russie, l'Iran et le Qatar détenaient à eux seuls plus de 50 % des réserves mondiales. Depuis, les évolutions techniques ont permis des découvertes de gaz non conventionnel menant ainsi à une réévaluation des

réserves de 60 à 250 % selon les zones.

L'usage du gaz naturel dans l'industrie, les usages domestiques puis la production d'électricité, se développait rapidement depuis les années 1970 et était sur le point de devancer le charbon. Cependant, avec le renchérissement observé depuis le début du XXI^e siècle, les tassements dans la consommation des pays développés, les besoins des pays émergents et les progrès réalisés dans le traitement du charbon, ce dernier tend à retrouver un certain essor.

Pour autant, la production mondiale de gaz naturel a enregistré une importante croissance de 7.3 % en 2010. Cette progression tient notamment à l'exploitation récente des gaz non conventionnels. En 2010, les États-Unis sont ainsi devenus grâce à eux les premiers producteurs de gaz naturel, déclassant la Russie, qui néanmoins demeure leader en termes d'exportations

Types de gaz

Il existe plusieurs formes de gaz naturel, se distinguant par leur origine, leur composition et le type de réservoirs dans lesquels ils se trouvent. Néanmoins, le gaz est toujours composé principalement de méthane et issu de la désagrégation d'anciens organismes vivants.

Aux différents types de gaz naturels cités ci-après, on pourrait adjoindre le biogaz, ou biométhane, un substitut renouvelable issu de la décomposition de certains déchets de l'activité anthropique.

- **Gaz conventionnel non associé**: C'est la forme la plus exploitée de gaz naturel. Son processus de formation est similaire à celui du pétrole. On distingue le gaz thermogénique primaire, issu directement de la pyrolyse du kérogène, et le gaz thermogénique secondaire, formé par la pyrolyse du pétrole. Le gaz thermogénique comprend, outre le méthane CH_4 , un taux variable d'hydrocarbures plus lourds, pouvant aller jusqu'à l'heptane (C_7H_{16}). On peut y trouver aussi du dioxyde de carbone (CO_2), du sulfure d'hydrogène appelé aussi *gaz acide* (H_2S), et parfois du diazote (N_2) et de petites quantités d'hélium (He), mercure (Hg) et argon (Ar).

C'est principalement ce type de gaz conventionnel non associé qui alimente le marché international du gaz naturel et ses réseaux de transport par gazoducs et méthaniers.

- **Gaz associé**: Il s'agit de gaz présent en solution dans le pétrole. Il est séparé lors de l'extraction de ce dernier. Pendant longtemps, il était considéré comme un déchet et détruit en torchère, ce qui constitue un gaspillage de ressources énergétiques non renouvelables et une pollution inutile. Aujourd'hui, une partie est soit réinjectée dans les gisements de pétrole (contribuant à y maintenir la pression et à maximiser l'extraction du pétrole), soit valorisée. La destruction en torchère représentait
-

toujours 150 km³ par an en 2007.

- **Gaz biogénique:** Le gaz biogénique est issu de la fermentation par des bactéries de sédiments organiques. À l'instar de la tourbe, c'est un combustible fossile mais dont le cycle est relativement rapide. Les gisements biogéniques sont en général petits et situés à faible profondeur. Ils représentent environ 20 % des réserves connues de gaz conventionnel. Le gaz biogénique a moins de valeur par mètre cube que le gaz thermogénique, car il contient une part non négligeable de gaz non combustibles (notamment du dioxyde de carbone CO₂) et ne fournit pas d'hydrocarbures plus lourds que le méthane.
- **Gaz de charbon:** Le charbon contient naturellement du méthane et du dioxyde de carbone dans ses pores. Historiquement, ce gaz a surtout été connu pour la menace mortelle qu'il présente sur la sécurité des mineurs – il est alors resté dans la mémoire collective sous le nom de grisou. Cependant, son exploitation est en plein développement, en particulier aux États-Unis. L'exploitation porte sur des strates de charbon riches en gaz et trop profondes pour être exploitées de façon conventionnelle. Il y a eu des essais en Europe également, mais la plupart des charbons européens sont assez pauvres en méthane. La Chine s'intéresse également de plus en plus à l'exploitation de ce type de gaz naturel.
- **Gaz de schiste:** Certains schistes contiennent du méthane issu de la dégradation du kérogène présent dans le schiste et piégé dans ses feuillets et micro-fissures. Mais comme pour le gaz de couche, il existe deux grandes différences par rapport aux réserves de gaz conventionnel. La première est que le schiste est à la fois la roche source du gaz et son réservoir. La seconde est que l'accumulation n'est pas discrète (beaucoup de gaz réuni en une zone restreinte) mais continue (le gaz est présent en faible concentration dans un énorme volume de roche), ce qui exige une technique spécifique. Depuis 2004, la technique principalement retenue est l'hydrofracturation associée à un forage *horizontal* dirigé. Elle permet d'atteindre et disloquer un plus grand volume de schiste avec un seul forage. Le schiste est pré-fracturé par des trains d'explosions puis une injection sous très haute pression d'un fluide de fracturation constitué d'eau, de sable et d'additifs (toxiques pour certains) étend cette fracturation. Chaque puits peut être fracturé (stimulé) plusieurs dizaines de fois. Chaque fracturation consomme de 7 à 28 millions de litres d'eau dont une partie seulement est récupérée.

Cette pratique, notamment aux États-Unis, est de plus en plus contestée, dénoncée comme affectant le sous-sol, les écosystèmes en surface et la santé. Les fuites de gaz semblent fréquentes et pourraient contaminer des puits. L'utilisation de produits toxiques risque de polluer les nappes phréatiques. L'eau de fracking remonte avec

des contaminants indésirables pour la santé et les écosystèmes (sels, métaux et radionucléides) pour toute personne vivant près d'une source d'extraction.

- **Hydrates**: Les hydrates de méthane sont des structures solides contenant du méthane prisonnier. Ils sont issus de l'accumulation relativement récente de glace contenant des déchets organiques, la dégradation est biogénique. On trouve ces hydrates dans le pergélisol ou sur le plancher océanique. Le volume de gaz existant sous cette forme est inconnu, les estimations varient de plusieurs ordres de grandeur selon les études. Aucune technologie rentable ne permet actuellement d'exploiter ces ressources, mais des tests sont en cours au Japon, malgré l'impact potentiel considérable sur les émissions de gaz à effet de serre de cette éventuelle exploitation

Impact environnemental

Les gisements les plus accessibles étant en cours d'épuisement, les industriels gaziers doivent forer plus profondément et exploiter des gaz *non-conventionnels* souvent plus sales, acides, corrosifs et toxiques. Les industriels ont ainsi à traiter et gérer une quantité croissante de soufre (sous forme de H₂S principalement). Ils sont de plus en plus confrontés à la présence de mercure et de sulfure de plomb et/ou de sulfure de zinc sources de risques de colmatage par entartrage minéral dans le puits, les vannes de sécurité ou la tête de puits. On parle maintenant de *gaz ultra-acides*, par exemple pour le gaz d'Elgin-Franklin en mer du Nord. 40 % de gaz des réserves mondiales connues en 2005 et susceptibles d'être exploitées (plus de 2 600 milliards de pieds cubes), sont acides ou ultra-acides et riches en H₂S. Dans ces réserves, plus de 350 milliards de pieds cubes contiennent plus de 10 % de H₂S. Outre des risques de corrosion exacerbés pour l'infrastructure extractive, ce caractère acido-toxique est a priori source d'un risque environnemental supplémentaire en cas d'accident ou de fuites chroniques.

La fracturation hydraulique consomme de grandes quantités d'eau et utilise des additifs chimiques souvent toxiques. Le torchage et les fuites ont en outre des effets directs et indirects sur le climat et l'acidification des milieux.

Le torchage est une émission directe et volontaire de gaz à effet de serre (sous forme de gaz carbonique CO₂ principalement).

Le secteur gazier génère en outre des émissions indirectes de méthane (CH₄) et d'autres polluants durant le forage, l'exploitation du gisement, le stockage, la compression, le transport et la distribution du gaz. Les techniques modernes de fracturation hydraulique augmentent le risque et le niveau de fuites ou de perte lors des forages et des incertitudes existent quand à la fiabilité à moyen ou long terme du colmatage des puits en fin de production, notamment en zone sismiquement active.

En termes d'émissions à la combustion le gaz naturel *classique* semble intéressant 37

gCO₂e par kWh; 202 gCO₂e par kWh; au total : 239 gCO₂e par kWh (à comparer au charbon qui émet 346 gCO₂e par kWh), mais le gaz de schiste a des émissions indirectes largement supérieures car la technique de fragmentation hydraulique utilisée pour son extraction entraîne des fuites de méthane d'au moins 4 % de la production du gisement; ce qui rend le gaz de schiste aussi émissif que le charbon.

Le gaz naturel a longtemps été présenté comme un carburant beaucoup moins nuisible pour le climat que le charbon et les produits *pétroliers*. C'est en partie vrai, car il produit par unité de masse moins d'émissions de gaz à effet de serre que les autres combustibles fossiles lorsqu'il est brûlé. Une centrale au gaz émet effectivement environ 57% moins de CO₂ par kilowatt-heure produit qu'une centrale au charbon, et est en moyenne 20% plus efficace pour convertir l'énergie du combustible en électricité qu'avec du charbon, le remplacement du charbon par le gaz a donc d'abord été présenté comme un pont vers un secteur de l'énergie décarboné. Cette assertion tend cependant à être nuancée voire contredite, notamment depuis les années 1980, quand les études ont commencé à prendre en compte les effets indirectes et connexes de l'exploitation des sources de méthanes fossiles, du cas particulier (qui tend à devenir le cas général) des gaz non-conventionnels ainsi que les effets indirects d'un prix moins cher de l'énergie-gaz (devenue provisoirement abondante grâce à la fracturation hydraulique). Des études récentes remettent en cause l'intérêt climatique du gaz naturel géologique, si la hausse de sa production devait se poursuivre. Le gaz de schistes, de couche et les gaz profonds sont en effet plus difficiles à collecter sans fuites de gaz vers l'atmosphère, la mer ou les nappes ou sans consommation importante d'eau et d'énergie. Et un bas prix incite au gaspillage et à consommation croissante de gaz (encouragée aux États-Unis par une réglementation imposant le passage du charbon au gaz, et non des alternatives encore plus propres). Le bilan carbone global du gaz de schiste apparaît parfois pire que celui du charbon et que les fuites de gaz induites par la fracturation et les fuites dans les réseaux contribuent au changement climatique.

Une étude publiée en septembre 2014 a confirmé que l'utilisation croissante de gaz naturel pourrait en outre significativement retarder le déploiement de sources d'énergie propres, sûres et renouvelables qui permettraient une économie réellement décarbonée.

Une étude publiée dans la Revue Nature en 2014 dresse un constat global et conclue que le gaz naturel ne va pas aider à réduire le changement climatique, mais au contraire augmenter la pollution par les gaz à effet de serre de près de 11%. On a constaté une importante baisse du prix du gaz aux États-Unis suite à l'exploitation de gaz profonds et du gaz de schiste. Cette étude en se basant sur divers modèles disponibles de réduction des effets de gaz naturel sur l'atmosphère a conclu que cette baisse des coûts du gaz pourrait freiner le processus de décarbonisation de l'économie et conduire à une augmentation de la consommation avec une légère hausse globale des émissions de gaz à effet de serre d'ici

à 2050.

Réserves de gaz naturel

La production en 2013 est de 3390.5 milliards baril: Etats-Unis 687.6 milliards m³, Russie 604.8 milliards m³, Iran 166.6 milliards m³, Canada 154.8 milliards m³, Algérie 78.6 milliards m³.

Les réserves mondiales sont estimées à 208 400 milliards m³. Russie 47 570 milliard m³, 22.82%, Iran 33 070 milliards m³ 15.86%, Qatar 24 300 milliards m³, 11.66%, Turkménistan 24 300 m³ 11.66%, Algérie en 10 ème position avec 4 502 milliards m³, 2.16%

2.6 Énergie Nucléaire

L'énergie nucléaire peut être exploitée de deux manières : par la fission du noyau des atomes, procédé utilisé dans les réacteurs nucléaires actuels, ou par la fusion de deux noyaux atomiques, réaction ayant lieu naturellement dans le soleil que le milieu de la recherche souhaite aujourd'hui reproduire sur terre. L'énergie nucléaire présente une densité énergétique hors pair. Son exploitation génère encore des craintes par la nature des technologies employées et la gestion des déchets qui s'en suit.

L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison des constituants du noyau des atomes. Ce noyau est un assemblage de protons, de charge positive, et de neutrons sans charge très fortement liés malgré la répulsion électrique entre protons. Le noyau est extrêmement compact, 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même.

Dans les atomes lourds le noyau contient beaucoup de protons qui se repoussent. Certains de ces noyaux (uranium, thorium, plutonium) peuvent devenir instables et se rompre en libérant une partie de leur énergie de liaison. C'est la fission de l'atome. Dans les atomes très légers, au contraire, deux noyaux peuvent se fondre pour former un atome plus lourd mais plus stable en dégageant une énergie considérable. C'est la fusion, par exemple de l'hydrogène en hélium.

Sur terre, la radioactivité naturelle, qui chauffe le magma, est à la base de la géothermie et du volcanisme. Dans l'univers, la fusion est omniprésente dans le cœur des étoiles, en particulier du soleil. Ces deux formes d'énergie naturelles se rencontrent et se combinent dans l'atmosphère terrestre, en entretenant des conditions favorables à la vie dans une couche atmosphérique très mince.

Les premières applications de l'énergie nucléaire ont été militaires, qu'il s'agisse de l'exploitation de la fission (Hiroshima – 1945) ou de la fusion (bombe à hydrogène – 1952).

Les applications civiles de la fission contrôlée ont démarré dès 1950 aux États-Unis pour la production d'électricité. La fusion contrôlée est encore au stade des laboratoires de recherche. L'énergie nucléaire a aussi donné lieu à d'autres applications majeures pour l'humanité en particulier en médecine, en radiothérapie et en imagerie médicale, et dans le spatial pour la propulsion des satellites.

2.6.1 La fission nucléaire

La fission nucléaire est le phénomène par lequel les noyaux des atomes lourds, comme ceux de l'uranium 235 ou du plutonium 239, sous l'effet de l'impact d'un neutron est divisé en deux autres nucléides plus légers. Cette réaction nucléaire se traduit aussi par l'émission de neutrons (en général deux ou trois) et un dégagement d'énergie très important (200 MeV par atome fissionné, à comparer aux énergies des réactions chimiques qui sont de l'ordre de l'eV par atome ou molécule réagissant). C'est l'énergie libérée par cette réaction qui est utilisée dans les réacteurs électronucléaires; elle apparaît sous forme de chaleur et, comme pour la combustion thermique, sa conversion en électricité a un rendement limité (près de 35% pour les réacteurs actuels).

Il existe deux types de fissions: la fission spontanée et la fission induite.

Fission spontanée

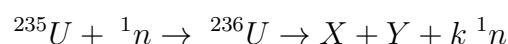
Le phénomène de la fission spontanée est découvert en 1940 par G. N. Flerov et K. A. Petrzhak en travaillant sur des noyaux d'uranium 238. On parle de fission nucléaire spontanée lorsque le noyau se désintègre en plusieurs fragments sans absorption préalable d'un corpuscule (particule subatomique). Ce type de fission n'est possible que pour les noyaux extrêmement lourds, car l'énergie de liaison par nucléon est alors plus petite que pour les noyaux moyennement lourds nouvellement formés. L'uranium 235 (dans une très faible proportion cependant), les plutoniums 240 et 244 et surtout le californium 254 sont par exemple des noyaux spontanément fissiles.

Fission induite

La fission induite a lieu lorsqu'un noyau lourd capture une autre particule (généralement un neutron) et que le noyau ainsi composé se désintègre alors en plusieurs fragments. La fission neutronique est une fission induite qui peut être soit thermique (où la particule induite est un neutron thermique ou lent) soit rapide (où la particule induite est un neutron rapide). Les noyaux atomiques pouvant fissionner sont dits *fissiles* ou *fissibles*.

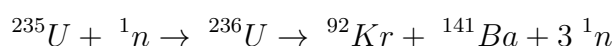
Actuellement, la fission induite par des projectiles de faible énergie (0 à 2 MeV) a été observée pour quelques actinides, l'uranium 233, 235 et 238 et le plutonium 239 et 241.

En absorbant un neutron, un noyau d'atome de l'uranium 235 se transforme ainsi en uranium 236, un isotope de l'uranium, dans un état excité de 6.2 MeV ($1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$). La fission induite de l'uranium 235 par absorption d'un neutron est la réaction la plus connue de ce type.



X et Y étant deux noyaux moyennement lourds et généralement radioactifs: on les appelle des produits de fission.

- Dans 16% des cas l'énergie est dissipée par rayonnement électromagnétique et le noyau de l'uranium 236 reste intact.
- Dans 84% des cas, cette énergie suffit pour que le noyau puisse franchir la barrière de fission, de 5.7 MeV et se fragmenter en deux autres noyaux comme par exemple le Krypton 92 (${}^{92}\text{Kr}$) et le Baryum 140 (${}^{141}\text{Ba}$) et trois neutrons:



ou bien le strontium 94 et le xénon 140 :

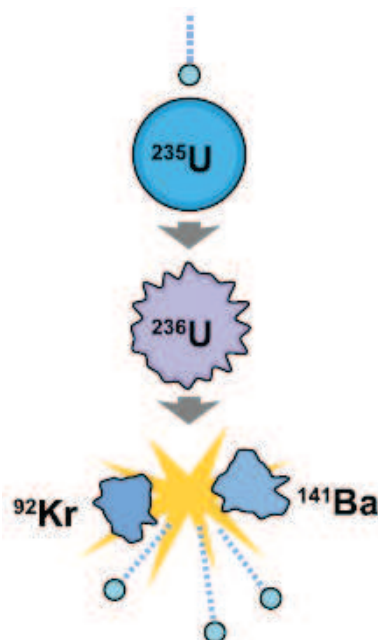
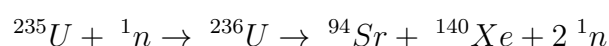


FIGURE 2.1 – Exemple de fission nucléaire

Une importante quantité d'énergie est libérée lors de cette fission, de l'ordre de 202.8 MeV pour un noyau d'uranium 235. La part principale de cette énergie est constituée

par l'énergie cinétique des deux atomes créés. Elle s'accompagne en général de l'émission d'un ou de plusieurs neutrons rapides (généralement 2 ou 3) qui ont une énergie cinétique moyenne de 2 MeV. Ceux-ci réagissent avec les noyaux qu'ils rencontrent et sont soit diffusés, c'est-à-dire renvoyés dans une direction différente, soit absorbés. Tant que la probabilité d'absorption reste faible, les neutrons se conservent pratiquement en nombre, mais leur énergie décroît peu à peu à chaque diffusion. Les noyaux sont d'autant plus efficaces pour ralentir les neutrons que leur masse est plus faible, plus proche de celle du neutron. C'est en particulier le cas de l'eau ordinaire (qui contient de l'hydrogène, le meilleur des modérateurs/ralentisseurs de neutrons), l'eau lourde (eau dans laquelle n'a été conservé, grâce à une séparation isotopique, que l'isotope lourd de l'hydrogène, le deutérium), le béryllium ou son oxyde la glucine, et enfin le graphite (carbone pur). Avec un modérateur efficace, les neutrons se ralentissent jusqu'à ce que leur énergie cinétique soit à peu près égale à l'énergie d'agitation thermique du milieu diffusant (0.025 eV à la température de 300 °K). La plupart des fissions se produisent alors à cette énergie et le réacteur est dit à neutrons thermiques. Dans le cas contraire, le réacteur est dit à neutrons rapides. La raison principale pour laquelle on cherche dans un réacteur thermique à ralentir les neutrons issus de fission pour les amener au niveau d'énergie (de vitesse) thermique est liée au fait que la probabilité qu'une rencontre d'un neutron thermalisé avec un atome fissile donne lieu à fission de l'atome rencontré est sensiblement 250 fois plus élevée que dans le cas où le neutron possède une énergie (une vitesse) élevée voisine de son énergie initiale. Certaines captures de neutrons ne donnent pas lieu à la fission du noyau et l'importance relative de ces captures parasites doit être strictement limitée pour qu'une réaction en chaîne, divergente ou stationnaire, soit réalisée. Pour entretenir une réaction en chaîne, l'un des n neutrons produits à chaque fission devra à son tour être absorbé dans le combustible, les $n - 1$ qui restent pouvant être perdus par capture dans les autres constituants du milieu, ou par fuite en dehors du dispositif. n dépend de l'énergie des neutrons. Dans le cas des neutrons thermiques, il est égal à 2.08 pour ^{235}U et ^{239}Pu , à 1.8 pour l'uranium enrichi, mais à 1.36 seulement pour l'uranium naturel. Le contrôle de la réaction en chaîne est assuré par l'insertion de barres de commandes contenant des matériaux très absorbants des neutrons, généralement désignés *absorbants mobiles de contrôle de la réactivité du coeur*. Les matériaux absorbants utilisés sont généralement le bore, le cadmium, l'argent, l'indium

La réaction en chaîne

Lors d'une réaction de fission nucléaire induite, l'absorption d'un neutron par un noyau fissile permet la libération de plusieurs neutrons, et chaque neutron émis peut à son tour casser un autre noyau fissile. La réaction se poursuit ainsi d'elle-même: c'est la réaction en

chaîne. Cette réaction en chaîne n'a lieu que si un neutron au moins émis lors d'une fission est apte à provoquer une nouvelle fission. Dans un milieu réactif, la vitesse à laquelle se déroule cette réaction en chaîne est mesurée par le facteur de multiplication.

Une mole d'uranium 235 pèse 235.0439299 grammes et contient NA (Nombre d'Avogadro) atomes. La fission de chaque atome produit environ 193 MeV d'énergie récupérable. Donc en supposant que l'on fissionne tous les noyaux d'uranium dans un gramme d'uranium 235 – ce qui est technologiquement impossible dans l'état actuel des connaissances – l'énergie produite serait alors égale à :

- 1 fission produit $193 \text{ MeV} = 193 \times 10^6 \times 1.60218 \times 10^{-19} = 3.0922 \times 10^{-11} \text{ J}$
- 1 gramme d'uranium 235 fissionné $1/235.0439299 \times NA$ fissions = $1/235.0439299 \times 6.02214129 \times 10^{23}$ fissions = 2.56213×10^{21} fissions.
- 1 gramme d'uranium 235 fissionné. $2.56213 \times 10^{21} \times 3.0922 \times 10^{-11} \text{ J} = 7.92263 \times 10^{10} \text{ J}$
- 1 Mégawatt.jour = $24 \text{ MWh} = 24 \times 3600 \times 106 \text{ J} = 8.64 \times 10^{10} \text{ J}$.
- 1 Mégawatt.jour \Leftrightarrow 1.09055 gramme d'uranium 235 fissionné.

1 Mégawatt.jour \Leftrightarrow 1.09 gramme d'uranium 235 fissionné C'est-à-dire tous les atomes d'uranium 235 présents dans $(1.09055 / 0.007202) = 151.42$ grammes d'uranium naturel.
Or;

- $1 \text{ Mgawatt} \times \text{jour} = 1000000 \times 24 = 1000 \text{ kW} \times 24 = 24000 \text{ kWh}$
- $24\ 000 / 151.42 = 158.497 \text{ kWh}$

Donc la fission de tous les atomes d'uranium 235 présents dans 1 g d'uranium naturel peut produire 158.5 kWh. Ces résultats restent exact au 1er ordre avec les autres gros atomes fissiles présents ou formés dans les réacteurs de puissance tel que le plutonium 239. Ils permettent d'évaluer avec une bonne précision la consommation de matière fissile dans tous les réacteurs de puissance (i. e. la masse des gros atomes fissionnés; i.e. les actinides fissionnés) et donc d'apprécier la quantité de produits de fission formés. La fission de la totalité des atomes d'uranium 235 fissiles contenus dans une tonne d'uranium naturel, qui contient en masse 0.7202 % d'uranium 235, donne $5.7059 \times 10^{14} \text{ J} (= 570600 \text{ GJ})$ soit plus de 10 000 fois plus d'énergie que la combustion d'une tonne d'équivalent pétrole qui dissipe 41.86 GJ. Toutefois étant donné que les procédés actuels ne permettent pas la fission intégrale de l'uranium 235 contenu dans l'uranium naturel on peut retenir l'ordre de grandeur de 10 000 fois plus d'énergie récupérable par tonne d'uranium naturel que par tonne d'équivalent pétrole. Cette estimation ne tient pas compte de la mise en oeuvre des réacteurs rapides qui permettent de fissionner l'intégralité de l'uranium naturel extrait du sous-sol. Dans cette hypothèse la quantité d'énergie théoriquement récupérable d'une tonne d'uranium naturel se trouverait sensiblement multipliée par $1/0.7202\%$ soit 138.9 et de façon plus réaliste compte tenu des pertes qu'il y aurait nécessairement par un facteur 100.

Notion de masse critique

Il ne suffit pas que le facteur de multiplication des neutrons soit plus grand que 1 pour que la réaction en chaîne s'entretienne: d'une part, les neutrons sont instables et peuvent se désintégrer, mais ceci joue peu, car leur temps de vie moyen est de près d'un quart d'heure, mais surtout, ils peuvent sortir du milieu où l'on essaie de faire une réaction en chaîne. Il faut qu'ils aient une collision avant de sortir, sinon ils ne participent plus à la réaction en chaîne. L'épaisseur moyenne du milieu fissile doit donc être assez grande pour assurer une probabilité suffisante pour les neutrons de rencontrer un noyau fissile. Ceci amène à la notion de masse critique de l'élément fissile, qui est une masse en dessous de laquelle on ne peut plus garder suffisamment de neutrons, quelle que soit la forme de la charge fissile, pour maintenir la réaction. Ceci explique pourquoi l'on ne peut pas avoir de mini-réacteurs nucléaires.

Ayant découvert et compris la fission vers 1930, l'homme a entrepris d'exploiter la fission des atomes lourds pour en extraire de l'énergie nucléaire. Dans la croûte terrestre, le minerai d'uranium est constitué à 99.3% d'uranium 238 stable et de 0.7 % d'uranium 235 fissile. A chaque désintégration, le noyau d'U 235 émet plus de deux neutrons. Au-delà d'une certaine concentration, un de ces neutrons provoque la désintégration d'un autre noyau d'U 235, et il peut se produire une réaction en chaîne. S'il est présent, l'U 238 peut aussi absorber un neutron pour se transformer en plutonium 239, lui aussi très instable comme U 235. En contrôlant cette réaction en chaîne, on dispose d'une source d'énergie continue puissante et compacte.

Les enjeux géopolitiques et environnementaux placent l'énergie nucléaire au cœur des débats. Ses caractéristiques sont les suivantes:

- Une exceptionnelle densité (1 gramme d'uranium U 235 produit la même quantité d'électricité que 2 tonnes de fioul ou 3 tonnes de charbon);
 - Un fonctionnement sans émission de dioxyde de carbone (CO₂);
 - Des réserves de combustibles bien réparties géographiquement, d'un siècle au minimum aujourd'hui, devenant millénaires dès que les réacteurs surgénérateurs en cours de développement seront capables de recycler les déchets accumulés par les centrales actuelles, en consommant beaucoup moins de matériaux fissiles;
 - L'énergie nucléaire de fission nécessite au départ des investissements lourds, obstacle important même si, in fine, elle s'avère très rentable;
 - La maîtrise de sa sûreté est très exigeante;
 - les risques de prolifération (nouveaux pays s'équipant d'armes nucléaires) sont difficiles à éliminer totalement;
 - Ses déchets, pourtant en faible volume, sont considérés comme dangereux, objet de débats où s'affrontent des logiques différentes.
-

Les acteurs majeurs de l'énergie nucléaire civile sont les États, et particulièrement ceux qui se sont dotés de l'arme nucléaire. Ils ont dû ainsi maîtriser les technologies qui sont aussi au cœur du nucléaire civil. Parmi ces pays: les États-Unis, la France, le Royaume-Uni, la Russie et ses anciens satellites, l'Inde et la Chine (Israël et le Pakistan n'ont pas encore de nucléaire civil). Des puissances économiques non dotées d'armes nucléaires ont également développé des capacités nucléaires civiles: l'Allemagne, le Canada, le Japon, la Corée du Sud, etc.

Près de 2 518 TWh d'électricité ont été produits dans le monde par des réacteurs nucléaires en 2011, dont 31.4% aux États-Unis, 16.1% en France et 6.6% en Russie. Viennent ensuite le Japon (6.2%) et la Corée du sud (5.9%). Il est probable que la Chine (3.9%) et l'Inde (1.1%) occupent prochainement une place parmi ces leaders, compte tenu des investissements énormes consentis pour le nucléaire civil dans ces deux pays.

Parmi les acteurs mondiaux majeurs, l'AIEA (Agence Internationale pour l'Énergie Atomique) dépend directement du conseil de sécurité de l'ONU. Elle a pour rôle ***d'assurer un usage sûr et pacifique des technologies et des sciences liées au nucléaire.***

Au niveau industriel, les principaux acteurs sont Areva/EDF, Westinghouse/Toshiba, GE/Hitachi, Mitsubishi, KEPCO (Corée du sud), Rosatom (Russie), AECL (Canada).

Il y a aujourd'hui 437 réacteurs produisant de l'électricité dans 31 pays, dont 103 aux États-Unis et 58 en France. L'Europe produit actuellement un tiers de l'électricité nucléaire mondiale. Cette dernière ne représente cependant que 5,7% de l'énergie primaire mondiale et près de 13% de l'énergie électrique (approximativement 19% aux États-Unis et 75% en France).

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire a également un rôle clé dans les secteurs d'activité suivants:

- en médecine: radiothérapie, imagerie médicale (IRM);
- en instrumentation industrielle et scientifique: neutrographie pour le contrôle non destructif;
- dans le domaine spatial : propulsion des satellites et sondes interplanétaires.

2.6.2 La fusion nucléaire

La fusion nucléaire aussi appelée *fusion thermonucléaire* est la réunion de deux noyaux atomiques légers pour former un noyau unique plus lourd et plus stable. Au cours de cette réaction de fusion, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux légers d'origine. Or, en vertu de la célèbre relation établie par Albert Einstein $E = mc^2$, la différence de masse est convertie en énergie. On peut notamment observer ce phénomène de fusion au sein des étoiles dans lesquelles une énergie colossale est libérée. Le phénomène de fusion nucléaire se différencie donc de celui de la fission nucléaire dans

lequel un atome lourd se scinde en deux atomes plus légers avec un dégagement d'énergie nettement inférieur.

Le processus de fusion nucléaire ne peut avoir lieu que dans des conditions de température et de pression particulières. A titre d'exemple, au cœur du soleil, la pression est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale atteint environ 15 millions de degrés. Dans ces conditions, les noyaux légers d'hydrogène (75% de la composition du soleil) fusionnent en noyaux d'hélium (24%) approximativement deux fois plus lourds, créant ainsi la lumière et la chaleur que nous recevons. Selon les calculs, 620 millions de tonnes d'hydrogène y sont transformés en 615.7 millions de tonnes d'hélium chaque seconde.

Pouvoir reproduire ce phénomène sur terre permettrait en théorie de satisfaire définitivement les besoins énergétiques de l'humanité. C'est précisément l'enjeu majeur de la recherche sur la fusion nucléaire contrôlée. Les combustibles nécessaires à la fusion sont deux isotopes de l'hydrogène: le deutérium, disponible en quantités pratiquement illimitées dans l'eau des mers, et le tritium que l'on produit à partir du lithium relativement abondant dans l'écorce terrestre.

La bombe thermonucléaire, couramment appelée bombe H, constitue aujourd'hui la seule application pratique de la fusion nucléaire. Celle-ci a été testée pour la première fois en 1952 aux États-Unis dans la foulée de la maîtrise de la bombe A (à fission nucléaire). Les armes thermonucléaires ont joué un rôle clé dans l'équilibre dissuasif entre les deux blocs pendant la guerre froide.

Des efforts de recherche sont menés depuis plus de 50 ans pour recréer les conditions de la fusion nucléaire au sein d'un réacteur. Toutefois, la maîtrise d'un processus contrôlé de fusion n'est pas encore démontrée et les technologies et matériaux adaptés à ces températures et pressions extrêmes ne sont pas encore disponibles pour une utilisation industrielle. Recréer un processus de fusion nucléaire s'avère beaucoup plus complexe que d'exploiter la réaction de fission en chaîne.

Si le principe novateur des centrales à fusion nucléaire est validé scientifiquement et technologiquement il permettra de développer une nouvelle source abondante d'énergie complémentaire de la fission nucléaire.

Les avantages écologiques

La fusion génère peu de déchets radioactifs, en plus de courte durée de vie, et pas de gaz à effet de serre. De plus, elle écarte tout risque d'emballement de la réaction nucléaire et donc toute menace d'explosion. Contrairement au procédé de fission nucléaire, la moindre perturbation au sein d'un réacteur à fusion par confinement magnétique entraînerait un refroidissement puis un arrêt spontané des réactions de fusion.

Les avantages économiques

La fusion nucléaire fait appel à des combustibles (deutérium, lithium) présents en grande quantité sur notre planète, de quoi alimenter les éventuels réacteurs à fusion pour de nombreux millénaires. Les risques de pénurie énergétique seraient donc écartés. Quelques grammes de combustible suffiraient pour déclencher et entretenir les réactions de fusion. Une centrale à fusion de 1 000 MWe aurait ainsi besoin de 125 kg de deutérium et de 3 tonnes de lithium (contre 2.7 millions de tonnes de charbon pour une centrale thermique de même puissance) pour fonctionner toute une année.

Les limites technologiques

L'état actuel des connaissances scientifiques ne permet pas aujourd'hui d'extraire suffisamment d'énergie des réactions de fusion pour produire de l'électricité. De plus, on ne sait pas encore fabriquer de matériaux pouvant résister assez longtemps au rayonnement et au flux de neutrons libérés au cours de ces réactions. Les scientifiques estiment que les technologies nécessaires à la mise en œuvre de la fusion nucléaire contrôlée à des fins de production énergétique ne seront pas disponibles avant de nombreuses décennies.

La fusion deutérium–tritium

Depuis une trentaine d'années, la quasi-totalité des recherches porte sur la fusion de deux isotopes de l'hydrogène: le deutérium et de tritium. Le premier existe à l'état naturel (présent dans l'eau de mer à hauteur de 33 g/m^3) et le second peut être produit à l'intérieur d'un réacteur industriel à fusion, par interaction avec du lithium. Ce dernier est présent sur terre à hauteur de 20 g/tonne dans la croûte terrestre et 0.18 g/m³ dans les océans. La température nécessaire à la fusion de ces deux isotopes est de l'ordre de 150 millions de degrés, soit dix fois la température du cœur du Soleil. Il se forme alors un plasma, quatrième état de la matière dans lequel les atomes sont totalement ionisés, c'est-à-dire que leurs noyaux et électrons ne sont plus liés. La réunion des noyaux atomiques légers pour former un noyau unique plus lourd et plus stable a alors lieu. Les neutrons dégagés lors de cette réaction irradient l'enceinte du réacteur qui emmagasine de l'énergie thermique.

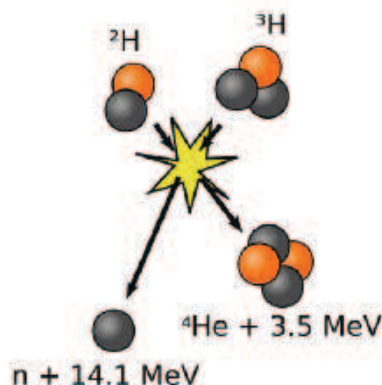


FIGURE 2.2 – Principe de la fusion nucléaire

Il existe deux voies de développement de réacteurs à fusion nucléaire:

Le réacteur à confinement inertiel : le mélange deutérium–tritium est enfermé dans des microbilles. Elles sont portées à très haute pression et température pendant un temps extrêmement court au moyen de lasers très puissants. La micro–explosion thermonucléaire obtenue produit une impulsion hyperpuissante de l’ordre du térawatt sur un laps de temps très court, environ 10 picosecondes.

Le Laser Mégajoule: dont l’installation doit être finalisée d’ici 2014 au centre CEA/CESTA, près de Bordeaux, en est un exemple. Il a pour objectif de reproduire en laboratoire des conditions physiques analogues à celles créées lors du fonctionnement des armes nucléaires. Ce Laser est essentiellement destiné à un usage scientifique et à la simulation d’explosions d’armes atomiques, tout comme son semblable américain, le NIF (National Ignition Facility) situé en Californie.

Le réacteur à confinement magnétique: les noyaux sont portés à plus de 100 millions de degrés Celsius dans des machines d’un volume important appelées tokamaks. Puisqu’aucun matériau ne peut résister à de telles températures, le plasma renfermant le mélange peu dense de deutérium et de tritium est confiné par un champ magnétique intense généré par des bobines situées autour de la chambre et par un fort courant électrique circulant dans le plasma. La fusion s’initie dès que la température, la densité et le temps d’isolation thermique du mélange atteignent les seuils critiques d’ignition.

Il existe plusieurs prototypes de tokamak dans le monde, dont l’installation Tore Supra à Cadarache. Le réacteur ITER, en construction sur ce site, appartient à la même famille.

Ces deux méthodes ont déjà permis d'obtenir de brèves réactions de fusion. Cependant, elles nécessitent pour le moment plus d'énergie qu'elles n'en créent. C'est pourquoi les axes principaux de la recherche dans les décennies à venir porteront sur l'allongement et l'optimisation du processus de fusion.

Le tokamak Un tokamak, dont le principe de fonctionnement est représenté par la figure 2.3, est une machine en forme d'anneau métallique creux (tore). Elle est utilisée par les scientifiques afin d'y créer des réactions de fusion nucléaire, pour produire de l'énergie. Le tokamak a été inventé dans les années 1950–1960 par les physiciens Igor Tamm et Andreï Sakharov. Le terme *tokamak* est tiré du russe *toroidal'naja kamera magnetnymi katushkami*, ce qui signifie en français: *chambre toroïdale avec bobines magnétiques*.

Des plasmas y sont chauffés à plusieurs millions de degrés au centre de l'anneau. Le plasma est le quatrième état de la matière dans lequel les atomes sont totalement ionisés, c'est-à-dire que leurs noyaux et les électrons les entourant ne sont plus liés. Cet état est indispensable à l'enclenchement de la réaction de fusion nucléaire car c'est à une température de l'ordre de 150 millions de degrés Celsius que la probabilité d'obtenir une réaction de fusion est maximum. De puissants champs magnétiques maintiennent le plasma à distance des parois en formant un anneau virtuel protecteur. Ils constituent une sorte de *bouclier* magnétique empêchant le plasma de s'approcher et de fondre les parois métalliques. C'est la caractéristique principale des tokamaks. Actuellement, ces champs magnétiques sont générés par des bobines supraconductrices installées autour de la chambre et par un courant électrique qui circule dans le plasma.

Les réactions de fusion nucléaire ont naturellement lieu au coeur des étoiles à des pressions et des températures extrêmes. A titre d'exemple, au cŒur du Soleil, la pression est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale atteint environ 15 millions de degrés Celsius pour une densité égale à 150 fois celle de l'eau. Dans ces conditions les noyaux légers d'hydrogène (75% de la composition du Soleil) fusionnent en noyaux d'hélium (24%) deux fois plus lourds, générant consécutivement la lumière et la chaleur que nous recevons. Selon les calculs, chaque seconde 620 millions de tonnes d'hydrogène y sont transformés en 615.7 millions de tonnes d'hélium.

Sur terre, le rôle du tokamak est de reproduire et de contrôler un processus de fusion, mais à des pressions plus faibles donc des températures plus élevées. Le combustible est un mélange d'isotopes de l'hydrogène. Ce mélange est chauffé à une température d'environ 150 millions de degrés pour en déclencher la fusion.

On estime à 200 le nombre de tokamaks qui ont été construits au cours de ces 40 dernières années. Cependant, malgré l'expérience accumulée, la technologie des tokamaks est encore en phase expérimentale et aucune application industrielle n'est attendue avant

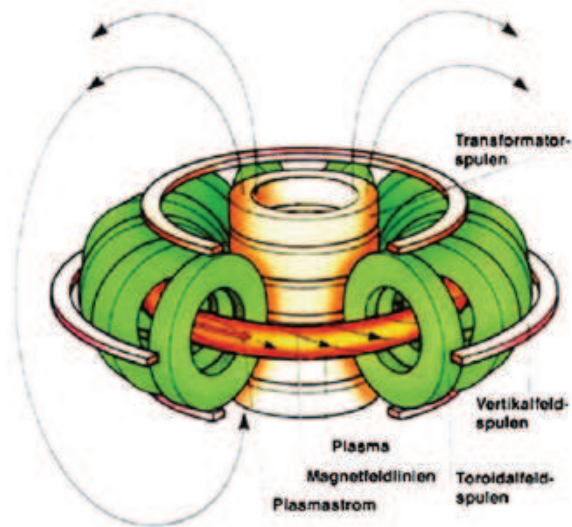


FIGURE 2.3 – Schéma du principe du Tokamak

plusieurs décennies.

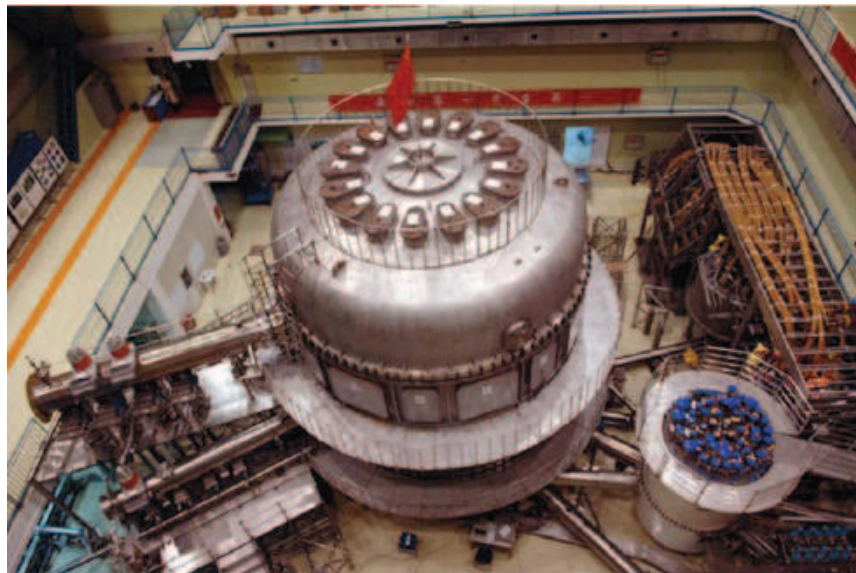


FIGURE 2.4 – Tokamak EAST

La technologie des tokamaks doit toutefois encore progresser afin de répondre aux problèmes techniques rencontrés:

- la physique des plasmas n'est pas une science parfaitement maîtrisée. Il est notam-

-
- ment très difficile de modéliser le comportement d'un plasma confiné;
- les matériaux internes d'un tokamak doivent à la fois faire face à des contraintes extrêmes: température, résistance aux champs magnétiques, stabilité aux radiations et au bombardement des neutrons de fusion et atteindre des durées de vie suffisantes. Dans un futur système industriel, la paroi devrait évacuer une densité de puissance très importante, de l'ordre de $20 \text{ MW}/\text{m}^2$. On ne connaît pour le moment aucun matériau capable de résister à ces conditions sur le long terme;
 - les isotopes de l'hydrogène utilisés comme combustibles possèdent des diffusivités élevées, en particulier le tritium. Le rayon de fuite de ce gaz radioactif doit être maîtrisé dans les tokamaks qui en font usage;
 - en irradiant les parois du tokamak, les neutrons issus de la réaction de fusion rendent les composants partiellement radioactifs pour une centaine d'années. Un plan de démantèlement efficace des installations doit donc être prévu;
 - pour atteindre l'objectif d'une fusion auto-entretenu, il est nécessaire de pouvoir confiner une grande quantité de plasma. Il faut par conséquent construire des tokamaks de grande envergure dont les coûts de construction et de maintenance sont très importants.
-

Chapitre 3

Les Ressources d'Énergie Renouvelable

3.1 Introduction

Les Sources d'énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions *sources d'énergie renouvelables* ou *énergies d'origine renouvelable* qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

L'humanité n'a disposé, pendant la plus grande part de son histoire, que des énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. À l'époque paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants).

Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant le IV^e millénaire avant J–C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine ont par la suite connu un développement mondial. L'invention de la marine à voile a été un progrès très important. Celle des moulins à eau et moulins à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. A la fin du XVIII^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au XIX^e siècle; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacées par les minoteries industrielles. Au milieu du XX^e siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Par contre, l'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin

du XIXe siècle. Au XIXe siècle également, François de Larderel met au point en Italie les techniques d'utilisation de la géothermie ; en 1911, la première centrale géothermique était construite à Larderello. Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque décollent au début des années 2000.

3.2 Énergie solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les microondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire. Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

3.2.1 Énergie solaire thermique

Dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0.1 et 100 micromètres. Il se caractérise par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique diminue son énergie calorifique et un corps recevant un rayonnement thermique augmente son énergie calorifique. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0.4 et 0.8 micromètre. Ainsi, en entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle ici d'énergie solaire thermique. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée par exemple pour réchauffer ou sécher des objets (y compris le corps humain) en les exposant au soleil. L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires),
- indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou héliothermodynamique))

L'énergie solaire thermique peut également être utilisée pour la cuisine. Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de

l'ordre des 150 °C, les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique. À grande échelle, la Fondation Desertec construit dans le Sahara des centrales solaires thermiques à concentration. D'après ses ingénieurs, les déserts de la planète reçoivent toutes les 6 heures du soleil l'équivalent de ce que consomme l'humanité chaque année et quelques centaines de km² d'étendue désertique pourrait satisfaire l'ensemble des besoins énergétiques de la planète.

3.2.2 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques:

Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.

Les modules solaires polycristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.

Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

3.3 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Éole (en grec Aiolos), le maître des Vents dans la Grèce antique.

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières:

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...);
- Production d'énergie électrique; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Le rendement énergétique de même que la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent; dans la plage de fonctionnement de l'éolienne, la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

Les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la plage de 11 à 90 km/h (3 à 25 m/s), que ce soit celles d'Enercon, celles d'AREVA pour l'offshore, ou celles d'ALSTOM, pour les éoliennes terrestres comme en offshore. Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'utilisation massive d'éolien nécessite, soit une énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène, méthanation ou air comprimé).

À la fin de 2013, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 318.6 GW, en augmentation de 35.6 GW en un an (+12,4 %), dont 11.3 GW pour l'Union européenne; le marché a connu un net ralentissement pour la première fois dans l'histoire de l'ère industrielle de l'éolien: les installations en 2012 avaient totalisé 44.2 GW, dont 11.8 GW pour l'UE; cette baisse du marché est due surtout à l'écroulement du marché des États-Unis (1084 MW contre 13078 MW en 2012), à cause de la reconduction très tardive du système d'incitation fédéral; le marché européen a légèrement fléchi en raison de l'adoption par plusieurs gouvernements de nouvelles politiques moins favorables; par contre, la Chine a représenté à elle seule près de la moitié du marché mondial: 16.1 GW. L'Europe a eu en 2013 une part de marché de 34.1 %, derrière le marché asiatique (51.2 % contre 35.6 % en 2012), et loin devant le marché nord-américain qui a chuté à 9.3 % contre 31.4 % en 2012. L'Europe reste cependant en tête pour la puissance totale en fonctionnement: 38.3 % contre 36.4 % pour l'Asie et 22.3 % pour l'Amérique du Nord.

Les fermes éoliennes en mer (éolien offshore) prennent une part grandissante dans cet essor, en particulier en Europe qui atteint fin 2013 une puissance installée totale d'éolien

offshore de 6 949 MW, dont 3 657 MW au Royaume-Uni.

Les éoliennes ont produit 446 TWh en 2011, soit 2 % de la production d'électricité mondiale (22 126 TWh). Voici l'historique des installations annuelles de 1996 à 2013:

En 2012, la production mondiale d'électricité éolienne a atteint 534.3 TWh, en augmentation de 18.3 % par rapport à 2011; son taux moyen annuel d'accroissement depuis 10 ans a été de 26.1 %; elle représente 11.4 % de la production totale d'électricité renouvelable et 2.4 % de la production mondiale d'électricité. L'énergie éolienne est la deuxième source d'électricité renouvelable après l'hydraulique. L'Europe de l'Ouest est en 2012 la première région productrice avec 36.8 %, devant l'Amérique du Nord (28.6 %) et l'Asie de l'Est et du Sud-Est (23.3 %); l'Asie du Sud (5.6 %), l'Europe Centrale (2.1 %) et l'Océanie (1.5 %) ont amorcé leur démarrage depuis quelques années; l'Amérique centrale (0.7 %), l'Afrique du Nord (0.4 %), l'Afrique Subsaharienne (0.04 %) et le Moyen-Orient (0.04 %) sont encore peu impliqués. La production a été multipliée par dix en une décennie; les taux moyens de croissance sur 10 ans sont particulièrement élevés en Asie de l'Est et du Sud-Est (+57.5 % par an) et en Amérique du Nord (+30.4 %), qui rattrapent rapidement l'Europe de l'Ouest (+18.4 %). En 2012, la filière éolienne a été, après l'hydraulique, la seconde par sa contribution à la croissance de la production d'électricité renouvelable (30 %).

En juillet 2014, le Maroc a pris la première place sur le continent africain en termes de puissance installée avec 1 157 MW répartis en 15 parcs. Il avait en (2007) 140 MW de puissance installée; 280 MW en 2009; 291 MW en 2012 (sans changement par rapport à 2011) et 495.2 MW à fin 2013; la production d'électricité éolienne atteignait 1 356 GWh en 2013 contre 728 GWh en 2012.

Le Parc de Tarfaya, en production concessionnelle, avec 131 éoliennes d'une puissance totale de 300 MW, est en cours de mise en service progressive jusqu'à octobre 2014 par une joint-venture entre le société marocaine Nareva et GDF Suez. Il devient ainsi le plus grand parc éolien marocain et africain, reléguant à la deuxième place au niveau national celui de Tanger, composé de 165 aérogénérateurs d'une puissance de 140 MW. L'initiative 1 000 MW est un programme qui consiste en la sélection d'un portefeuille de sites qualifiés pour la réalisation de futurs parcs éoliens. Le Maroc prévoit pour 2020 des parcs éoliens fournissant 12 % de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000 MW

Le plus grand problème de l'énergie éolienne est son caractère intermittent: elle n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques. Une éolienne produit, en moyenne, l'équivalent de moins de 20 % du temps. La plupart du temps, la nécessité d'assurer la constance de la production électrique oblige à coupler un parc éolien avec d'autres sources d'électricité disponibles immédiatement, à la demande telles que les énergies hydrauliques (barrages) ou fossiles (centrales à charbon ou à gaz) par exemple. Si

bien que, dans l'optique d'un réseau incluant également des énergies fossiles, la production électrique n'est au bout du compte pas exempte d'émissions de dioxyde de carbone mais néanmoins moins polluante qu'un réseau d'énergie totalement fossile.

Le vent est une ressource aléatoire, bien que d'autres estiment qu'à l'échelle de temps de l'ordonnancement d'un réseau électrique la météo soit suffisamment sûre pour que la ressource soit prévisible.

Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage.

Stockage hydraulique

Une méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler avec des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes. Cette technique est à la fois la plus simple et la plus prometteuse après le simple couplage à un potentiel hydraulique supérieur ou égal au potentiel éolien, comme c'est le cas dans le partenariat Danemark-Norvège.

- Une ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70 % pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Les 30 % restants sont envoyés sur le réseau.
 - En périodes de moindre vent, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydro-électrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau.
 - Le principe peut être inversé avec un puits vidé de son eau grâce aux surplus d'électricité, et rempli gravitairement en alimentant en eau des turbines. Pour les petites installations, il est envisageable d'utiliser les retenues collinaires créées par les exploitants agricoles à des fins d'irrigation;
 - La source de production éolienne doit être utilisée en priorité pour recharger les lacs d'accumulation quand la consommation est assez faible, la souplesse de l'hydro-électricité permettant ensuite une modulation précise de la production. Dans un tel cadre, c'est la capacité hydroélectrique qui est déterminante, ce qui fait de l'éolien un appoint à l'hydroélectrique;
 - La capacité de pompage-turbinage ne doit pas être saturée par une autre source de production.
-

Stockage par transformation

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité. Dans la nacelle des éoliennes, au lieu d'un alternateur se trouve donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir.

Du point de vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique sur le pic de consommation, où l'électricité est payée plus cher, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers stockage puis stockage vers électricité).

Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide.

En 2009, les Néerlandais de Dutch Rainmaker ont réalisé une éolienne dont l'énergie est utilisée pour condenser la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant. Le premier prototype a ainsi condensé 500 l d'eau douce en 24 h.

En 2010, l'institut allemand Fraunhofer explique dans un communiqué avoir réussi à mettre au point un processus de production de méthane à partir de la production en excès des éoliennes. L'électricité est utilisée pour faire une électrolyse d'eau, produisant de l'oxygène (rejeté) et de l'hydrogène. Cet hydrogène est recombinaé à du CO₂ (sans doute par réaction de Sabatier) pour produire du méthane, qui est réintroduit dans le circuit de distribution public de gaz naturel. La première partie de cette réaction était déjà utilisée par Poul La Cour en 1890.

3.3.1 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes: chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique lié au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du Soleil, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur Terre (énergie éolienne, énergie des vagues, la biomasse, les énergies fossiles, etc.). Sous l'action du Soleil, l'eau s'évapore des océans et forme les nuages qui se déplacent au gré des vents. Des abaissements de température au-dessus des continents provoquent la condensation de la vapeur d'eau. La

pluie et la neige (les précipitations) alimentent ainsi les glaciers et l'eau des rivières qui s'écoulent petit à petit dans les océans, c'est le cycle de l'eau.

L'énergie hydraulique est connue depuis longtemps. C'était celle des moulins à eau, entre autres, qui fournissaient de l'énergie mécanique pour moudre le grain, fabriquer du papier ou puiser de l'eau pour irriguer les champs par exemple.

Dès les années 1900, les progrès technologiques de l'hydroélectricité suisse sont à l'origine d'intenses spéculations boursières sur les sociétés hydroélectriques, qui profitent aux implantations industrielles dans les Alpes.

L'énergie hydraulique peut être convertie directement en énergie mécanique, par exemple en utilisant la force de l'eau d'un ruisseau pour faire tourner la roue d'un moulin à eau ou d'une noria. L'énergie hydraulique peut aussi être convertie en une autre énergie (fréquemment l'électricité):

- une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute et du débit d'un cours d'eau;
- une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées;
- une hydrolienne utilise celle des courants marins;
- l'énergie des vagues peut aussi être exploitée.

3.3.2 Énergie marine

L'énergie marine ou énergie des mers est l'énergie renouvelable extraite du milieu marin. Les mers et océans représentent 71 % de la surface du globe. Ils pourraient en théorie fournir 30 000 GTep à partir du seul rayonnement solaire sur leur surface, 40 GTep par la force du vent en mer, dont une partie se transforme en houle et vagues, et 2 GTep par la force des courants de marées dus principalement à l'attraction lunaire.

Il faut ajouter à cela l'énergie potentielle liée aux différences de température selon la profondeur et celle des gradients de salinité dans les estuaires. À titre de comparaison, pour 2050, les besoins de l'humanité sont estimés à 16.5 GTep.

Pendant longtemps les énergies des mers ont été les oubliées des budgets de recherche.

Les énergies marines incluent:

- l'énergie marémotrice, due aux mouvements de flux et de reflux des marées;
 - l'énergie hydrolienne, exploitant les courants marins;
 - l'énergie houlomotrice, produite par le mouvement des vagues;
 - l'énergie thermique des mers, exploitant les gradients de température entre les eaux de surface et les eaux profondes;
 - l'énergie osmotique, basée sur les différences de salinité des eaux douces et salées;
 - l'éolien off-shore, éolien situé en mer sur des plateformes ancrées ou flottantes;
 - l'énergie de la biomasse marine;
-

- une variante sous-marine du cerf-volant supportant une turbine (c'est ici le courant marin qui maintient le cerf-volant fixé par un câble au fond et qui exécute une trajectoire permanente en forme de huit.

3.4 Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple: en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

L'augmentation de la consommation et du coût des différentes énergies ainsi qu'une certaine volonté d'émettre moins de gaz à effet de serre la rendent plus attrayante.

3.4.1 Types de géothermie

On distingue habituellement trois types de géothermie:

- la géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température;
- la géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C); avec plusieurs approches développées et explorées depuis les années 1970:
 - géothermie des roches chaudes sèches (Hot Dry Rock ou HDR pour les anglophones), basée sur la fracturation et la création d'un *échangeur thermique profond* qu'il faut périodiquement décolmater;
 - géothermie des roches naturellement fracturées ou Hot Fractured Rock (HFR);
 - géothermie stimulée EGS (Enhanced Geothermal System), imaginée aux États-Unis en 1970.
- la géothermie très profonde à très haute température.

Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma

Un des témoignages les plus anciens date de 2 000 ans avant Jésus-Christ. Il cite les îles Lipari (Italie) qui exploitaient déjà une eau naturellement chaude pour leurs thermes.

Les techniques modernes de forage ont permis d'atteindre des eaux chaudes jusqu'à 12 262 m de profondeur avec le forage sg3 qui dans les régions froides de la péninsule de Kola (Russie) exploite une eau à plus de 180 °C.

Les Philippines produisent 28 % de leur électricité à partir de la géothermie et l'Islande a atteint la production de 100 % de son électricité par l'hydroélectricité et la géothermie.

3.4.2 Principes

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium).

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température appelé gradient géothermique qui définit que plus on creuse et plus la température augmente; en moyenne de 3 °C par 100 mètres de profondeur.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur (même si le flux de puissance obtenu diminue avec la profondeur, puisque l'essentiel de ce flux provient de la radioactivité des roches de la croûte terrestre).

Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable (dans certaines limites), car elle dépend

- pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie se chiffre en milliards d'années;
- pour la géothermie de surface, des apports solaires.

Elle est en général diffuse et rarement concentrée, avec un flux moyen de 0,1 MW/km² et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie) a l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne). Elle peut quand même contribuer à un réchauffement local des milieux là où les calories seront relarguées si elles le sont massivement.

3.5 Biomasse

Le pouvoir calorifique de la matière organique, qui n'est que la moitié environ de celui du charbon, peut servir à produire de l'électricité à partir de procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, combustion directe) ou à partir de procédés biochimiques (digestion anaérobie ou méthanisation). La biomasse ligneuse, c'est-à-dire le bois, la bagasse (fibre de la canne dont on a extrait le sucre), la paille, etc., est essentiellement utilisée dans des procédés à base de combustion. En Europe, ce sont les industries de transformation du bois (principalement les usines de pâte à papier) qui, en brûlant leurs résidus, produisent de la chaleur et de l'électricité (c'est la cogénération). Les meilleurs rendements sont en effet obtenus dès qu'il y a une production simultanée de chaleur, les 2/3 de l'énergie potentielle du combustible étant transformés en chaleur. L'utilisation de 1 tonne de bois permet d'éviter le dégagement dans l'atmosphère de 1 tonne de CO₂ d'origine fossile. La biomasse se caractérise généralement par une faible teneur en cendres et sa quasi absence de soufre. De plus le CO₂ rejeté par la combustion de la biomasse dans les centrales est réabsorbé par les végétaux pour leur croissance (photosynthèse): faisant partie d'un véritable cycle, il ne s'ajoute pas à celui déjà contenu dans la biosphère, contrairement au carbone issu des combustibles fossiles. Valoriser le biogaz en électricité et/ou chaleur évite l'émission de méthane (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère.

le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agroc carburant). Cette filière, correspondant à des objectifs de développement durable, est en développement rapide. L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive pour l'usage des ressources (terres arables, eau, etc), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc. De plus, bien que présentant de nombreux avantages écologiques et en termes de développement local, elle peut être polluante (CO, CO₂, fumées, goudrons) si mal utilisée ou si la biomasse utilisée est polluée par des métaux lourds, radionucléides, etc. (sachant que les ressources fossiles sont également naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois). Comme dans le cas des ressources fossiles, il s'agit d'une forme de stockage de l'énergie solaire par l'intermédiaire du carbone, provenant originellement du CO₂ capté par les plantes ou le phytoplancton. En brûlant, elle libère ce CO₂, comme le charbon, le gaz ou le pétrole, mais ce carbone a récemment été extrait de l'atmosphère via la photosynthèse et peut être à nouveau capté par les plantes, alors que ce processus a eu lieu il y a des millions d'années pour les ressources fossiles et que les plantes et algues marines ne suffisent plus à absorber le carbone issu des hydrocarbures

fossiles. La biomasse peut être tirée de la nature ou cultivée (agrocarburants, agrocombustibles). La biomasse est utilisée par l'homme depuis qu'il maîtrise le feu. Elle reste la première énergie renouvelable utilisée dans le monde, pour le chauffage et la cuisson des plats de cuisine, mais essentiellement dans les pays peu industrialisés. L'énergie tirée de la biomasse intéresse à nouveau les pays riches confrontés au dérèglement climatique et à la perspective d'une crise des ressources en hydrocarbures fossiles. C'est une filière en développement rapide, y compris sous des formes industrielles avec les agrocarburants et le bois énergie à usage industriel. Avec 30.7% du total mondial, les États-Unis sont le premier producteur d'électricité à partir de la biomasse, devant l'Allemagne et le Brésil (7.3 %). Dans l'absolu, le bilan quantitatif CO₂ d'une installation est nul quand toute l'énergie qu'il a fallu dépenser pour extraire du combustible de la biomasse provient elle aussi de la biomasse. En régime industriel établi, il est possible d'utiliser de la biomasse pour le fonctionnement de l'installation, en veillant à ne pas libérer d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane CH₄ notamment qui a un pouvoir réchauffant environ 21 fois plus important que le CO₂ à court terme, mais qui disparaît plus vite que celui-ci. Une fuite sérieuse dans une installation de méthanisation rendrait son bilan GES très négatif. Son introduction dans les systèmes énergétiques contribue à réduire (en termes de bilan global) les émissions de gaz à effet de serre, voire à restaurer certains puits de carbone (semi-naturels dans le cas des boisements et haies exploités).

Chapitre 4

Stockage de l'Énergie

4.1 Introduction

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme *stockage d'énergie* est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

Le stockage de l'énergie est au coeur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes: leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

L'accroissement mondial de la demande en énergies fossiles, la hausse des cours qui en résulte et les troubles politiques de plusieurs pays producteurs rendent l'approvisionnement partiellement incertain. Le stockage de l'énergie est donc un atout géostratégique,

notamment dans le cas des hydrocarbures.

Dans le domaine économique, en particulier lors des pointes de consommation, le stockage de l'énergie peut permettre de réguler les fluctuations des prix indexés sur les variations de l'offre et de la demande. Pour les entreprises et les particuliers consommateurs, une énergie disponible, sans interruption ou hausse des prix inopinée, est une nécessité au regard des modes de vie actuels. Le stockage est aussi un moyen de limiter les pertes lors d'une surproduction et donc de réduire la consommation globale d'énergie.

D'un point de vue technologique, le développement des équipements portables et des véhicules hybrides et électriques nécessite de nouvelles formes de stockage permettant d'héberger une forte densité d'énergie dans un volume limité et de la restituer aisément.

Pour la production d'énergie, le stockage est essentiel: en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement production d'énergie est :

- soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fissile,...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique.
- soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire.

Du point de vue physique, il n'y a jamais *production d'énergie*, mais seulement transformation d'une énergie disponible dans la nature.

Le stockage consiste à constituer un stock d'énergie potentielle à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, afin de pouvoir en disposer plus tard, lorsque la demande sera plus importante. La nature procède naturellement à ce stockage, par exemple avec la biomasse (non fossile), le cycle climatique de la Terre (pluie, neige,...), les marées,... Certains stockages naturels n'ont eu lieu qu'à l'échelle de temps géologique (création du charbon, du pétrole et du gaz, formation des étoiles et des éléments radioactifs dans les noyaux des planètes,...). Aujourd'hui, les stocks s'épuisent, leur renouvellement étant infinitésimal à l'échelle de temps de la vie humaine, raison pour laquelle ces ressources sont appelées non-renouvelables. Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines. Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût très élevé, non seulement en termes de coûts économiques, mais aussi en termes de coûts sociaux : santé, sécurité, etc ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses; tout hôpital se doit de disposer de plusieurs groupes électrogènes de secours et de stocks de carburant. Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales:

- sécurisation de l’approvisionnement en énergie d’un pays ou d’un groupe de pays;
- ajustement de la production d’énergie en fonction de la demande;
- compensation de l’irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

Une rupture de l’approvisionnement en énergie peut gravement désorganiser l’économie d’un pays et mettre en danger des fonctions vitales: défense, système de santé, etc. Il est donc essentiel de disposer de stocks suffisants pour faire face à une coupure des flux d’approvisionnement, en particulier en cas de crise géopolitique. Le premier choc pétrolier de 1973, créé par une baisse concertée des livraisons de pétrole par les pays de l’OPEP, suscitant une envolée des prix pétroliers, a amené les 16 nations les plus industrialisées (rejointes ultérieurement par 12 membres additionnels) à créer l’Agence Internationale de l’Énergie, chargée de coordonner leurs politiques énergétiques et de mettre sur pied une économie raisonnée de la ressource. Pour pouvoir adhérer à l’AIE, un pays doit prouver qu’il dispose de réserves de pétroles équivalentes à 90 jours d’importations, à disposition immédiate du gouvernement au cas où des mesures d’urgence seraient décidées par l’AIE; il doit également avoir mis au point un programme de rationnement capable de réduire de 10 % la consommation nationale de pétrole. En 2011, lorsque la guerre civile libyenne a causé une chute de la production de ce pays, l’AIE a décidé de prélever 60 millions de barils dans ces réserves stratégiques. La réserve stratégique de pétrole la plus importante, celle des États-Unis, atteignait 696 millions de barils à la fin 2011, soit 82 jours d’importations nettes. Les stocks de gaz jouent un rôle majeur dans le fonctionnement et la sécurité du système gazier. La politique de l’Union européenne en matière de sécurisation de l’approvisionnement en énergie est exposée dans le Livre vert de 2006 intitulé *Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable*, préconisant en particulier une nouvelle proposition législative concernant les stocks de gaz qui donnerait à l’UE les moyens de réagir selon le principe de la solidarité entre les États membres en cas de situation d’urgence.

Cette nouvelle réglementation, adoptée en 2010, enjoint chaque état membre de désigner une autorité compétente chargée d’établir des plans d’urgence, des évaluations des risques, et d’imposer aux entreprises gazières de prendre les mesures nécessaires pour garantir des standards de sécurité d’approvisionnement, sans fixer d’objectif précis en matière de stockage; elle promet surtout des mesures de diversification d’approvisionnement (gazoducs évitant la Russie par le Sud, terminaux méthaniers) et d’amélioration des capacités d’échange, en particulier la bi-directionnalité des gazoducs. Dans le nucléaire, l’uranium contenu dans l’amont du cycle du combustible nucléaire (conversion en hexafluorure d’uranium, enrichissement, fabrication des assemblages, combustible en réacteur) représente plusieurs années de consommation, ce qui garantit une forte capacité de résistance à une rupture d’approvisionnement. Une des règles fondamentales de la sécurité

des centrales nucléaires est la redondance des dispositifs de secours : chaque centrale doit disposer de plusieurs sources d'alimentation électrique, par exemple des groupes diesel avec leurs stocks de carburant, afin de prendre le relais de l'électricité du réseau pour maintenir en fonctionnement les pompes du circuit de refroidissement

4.2 Ajustement production d'énergie – demande d'énergie

L'ajustement de la production d'électricité à la demande se fait pour l'essentiel par l'utilisation de moyens de production modulables à volonté, en particulier les centrales à gaz; des contrats d'effacement passés avec les consommateurs capables d'arrêter tout ou partie de leur consommation pendant les périodes de forte demande contribuent également, de façon encore marginale, à cet ajustement. Il est envisagé d'aller plus loin dans la maîtrise de la demande en énergie grâce aux smart grids. Des moyens de stockage sont aussi utilisés, comme les stocks de charbon ou de gaz sur le site des centrales électriques.

4.3 Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie

Sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante, comme la lumière solaire dans la biomasse, le vent ou la pluie, le stockage d'énergie est associé à l'opération inverse: l'opération consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage d'énergie). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial (idéalement vide); on a alors régénéré le stockage.

L'efficacité énergétique d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. Ce rapport est généralement inférieur à 1, sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante où il peut être considéré comme infini (division par zéro), puisque personne ne fournit l'énergie à stocker, qui est de fait gratuite.

L'efficacité énergétique d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en oeuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Dans tous les cas, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière: une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Mais pour de l'énergie ambiante naturelle, ces pertes influent surtout sur l'amortissement

économique des investissements éventuellement nécessaires: la lumière du soleil arrive même si l'humain ne la capte pas.

4.4 Les grandes formes de stockage

Le stockage est directement lié à l'usage qu'on fait de l'énergie.

- **Stockage de combustible:** La combustion restant le processus énergétique le plus courant, c'est le stockage le plus développé. Tous les États disposent de stocks stratégiques de pétrole et/ou charbon, mais même en excluant ces éléments fossiles, il faut rappeler l'importance pratique du bois-énergie, dont on fait des stocks pour l'hiver, et le développement des agrocarburants.
- **Stockage électrochimique:** À plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue de la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs) est bien moindre en termes de quantité d'énergie, mais très important sur le plan pratique. De nouvelles approches et/ou de nouvelles batteries associées à un système *intelligent* de gestion de l'énergie, permettent de doper le stockage d'électricité intermittente (solaire, éolienne), pour stocker et autoconsommer jusqu'à plus de 75 % de la production d'électricité photovoltaïque d'une maison équipée de modules photovoltaïques.
- **Stockage de calories:** Au-delà de l'usage du cumulus, des habitations de grande inertie thermique (murs épais, bonne isolation) permettent de lisser et diminuer les besoins de chauffage et de rafraîchissement, permettant des économies directes. Les matériaux à changement de phase peuvent aussi dans les bâtiments accumuler de l'énergie solaire thermique de chauffe-eau solaires individuels. Les matériaux à changement de phase permettent de lisser la production d'énergie (gratuite) fournie par le soleil et d'augmenter la capacité de stockage grâce à leur grande densité énergétique volumique. À l'échelle industrielle, on peut stocker la chaleur solaire dans des réservoirs, comme intermédiaire avant la production d'électricité, pour lisser l'apport solaire; ce type d'usage est marginal en volume mais c'est une voie intéressante dans le cadre d'une production électrique par une centrale solaire thermodynamique.
- **Stockage mécanique:** C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde.

Il n'est pratiquement pas utilisé pour le stockage à long terme, car les quantités d'énergie stockées sont très faibles (ainsi une automobile d'une tonne lancée à 150 km/h ne représente que 860 kJ, soit moins de 1/4 kWh), mais a été utilisé en Formule

- 1 pour un gain ponctuel mais instantané de puissance.
- **Stockage sous forme d'énergie potentielle de pesanteur:** La remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité est déjà très utilisée pour la régulation et l'équilibrage des réseaux électriques (systèmes de pompage-turbinage). Son utilisation est envisagée par certains experts pour compenser l'irrégularité de la production des énergies éolienne et solaire.

4.5 Stockage du gaz

Avant d'être dirigé vers le consommateur final, le gaz naturel transite par des sites de stockage installés près des gisements ou des zones de consommation.

Le stockage du gaz permet de répondre aux attentes des producteurs et des consommateurs. En stockant une partie du gaz extrait, les producteurs garantissent de pouvoir livrer des volumes stables de gaz tout au long de l'année. Pour les consommateurs, le stockage du gaz garantit un approvisionnement continu. Ainsi le gaz acheminé vers les zones de consommation n'est pas forcément utilisé tout de suite. Il est alors stocké pour être réutilisé dès que la demande le justifie.

Le gaz naturel est stocké dans des réservoirs conçus à cet effet dans des sites de stockage dits *aériens* ou dans des sites de stockage dits *souterrains*.

Aujourd'hui, le stockage du gaz naturel constitue un maillon logistique incontournable pour assurer l'équilibre énergétique d'un pays.

Plusieurs méthodes permettent de stocker le gaz dans des sites aériens ou souterrains.

4.5.1 Le stockage aérien

Le stockage aérien ne nécessite pas de conditions géologiques particulières:

- Les réservoirs de gaz: ils sont utilisés pour stocker le gaz à pression atmosphérique. Ils se présentent sous forme de réservoirs cylindriques. Leur capacité de stockage est comprise entre 500 et 10 000 m³;
 - Les réservoirs de GNL (Gaz Naturel Liquifié): ils sont utilisés pour stocker le gaz à pression atmosphérique à l'état liquide. A environ -161 °C, le gaz naturel se condense pour devenir un liquide, le gaz naturel liquéfié (GNL). Celui-ci occupe 600 fois moins de volume qu'à l'état gazeux. Les réservoirs GNL sont des réservoirs cylindriques verticaux installés près des terminaux méthaniers pour réceptionner et stocker le GNL acheminé par navires méthaniers. Ces réservoirs métalliques ou en béton ont une double paroi et une isolation thermique puissante afin de maintenir le gaz à l'état liquide.
-

4.5.2 Le stockage souterrain

Privilegié par de nombreux pays lorsqu'il est possible, le stockage souterrain représente le moyen technique le plus efficace et le plus économique pour répondre aux fluctuations de la demande en gaz. Il est également considéré comme un moyen sûr vis-à-vis de la sécurité publique et de l'environnement. Un stockage aérien, pour un usage similaire, nécessite des installations sur plusieurs hectares avec des risques d'accidents accrus. Les types de stockage souterrain dépendent des structures géologiques disponibles:

- Les gisements épuisés: du gaz sous pression est injecté dans d'anciens gisements d'hydrocarbures naturellement imperméables, qui sont reconvertis pour le stockage. Cette méthode permet de stocker efficacement le gaz. Le soutirage du gaz est un flux continu avec peu de flexibilité et un rythme faible;
- Les nappes aquifères: la technique du stockage en nappes aquifères consiste à reconstituer l'équivalent géologique d'un gisement naturel en injectant le gaz dans une couche souterraine de roche poreuse contenant de l'eau et recouverte d'une couche imperméable formant une couverture étanche, le tout ayant une forme de dôme. Le gaz injecté sous pression remplit le volume de la cavité non occupé par l'eau en poussant celle-ci vers la périphérie du réservoir. Tout comme les gisements épuisés, certaines contraintes géologiques rendent le soutirage moins flexible. Une quantité de l'ordre de la moitié du gaz stocké reste à demeure dans le stockage: c'est le gaz coussin;
- Les cavités salines: la technique du stockage en cavités salines consiste à créer par dissolution à l'eau douce (lessivage) une cavité souterraine artificielle de grande taille (entre 100 000 et 1 million de m³) dans une roche sédimentaire composée de sel gemme (des cristaux de chlorure de sodium). L'imperméabilité naturelle du sel gemme permet le stockage du gaz. Le soutirage étant plus flexible, les cavités salines sont utilisées pour répondre à la demande notamment lors des pics de froid. Le débit du gaz est 5 à 6 fois plus important que celui des autres types de stockage souterrain.

Dans les stockages souterrains, le gaz est injecté sous pression (entre 40 et 270 bars). Cela facilite en retour le soutirage du gaz.

Le stockage en nappes aquifères et en cavités salines requiert en amont des travaux de prospection géologique coûteux dont il n'est pas certain qu'ils aboutissent à une recommandation ferme. Les travaux d'exploration et de mise en fonctionnement durent en moyenne 4 ans contre 2 ans pour un réservoir épuisé.

- Les capacités mondiales de stockage sont actuellement estimées à plus de 300 milliards de m³.
 - Il existe aujourd'hui plus de 700 lieux de stockage souterrain dans le monde (cavités salines, nappes aquifères et gisements épuisés).
-

- Ainsi, on compte une centaine de cavités salines réparties sur environ 25 sites dans le monde.

Essentiel pour garantir un approvisionnement et une consommation continue, le stockage du gaz répond à d'importants enjeux :

- Le stockage du gaz joue un rôle stratégique car il permet de pallier les défaillances techniques ou politiques des fournisseurs. Cette fonction est particulièrement importante dans le cas d'une forte dépendance énergétique d'un pays vis-à-vis d'un petit nombre de producteurs;
- Le stockage du gaz permet d'équilibrer les approvisionnements, relativement constants au cours de l'année, et les besoins en gaz naturel qui varient fortement suivant les saisons. Ainsi, il est rempli pendant les mois de sous-consommation (en été) et vidé pendant les mois de surconsommation (en hiver). En modulant les flux gaziers dans le temps selon l'offre et la demande, le stockage devient un complément essentiel au transport du gaz. Il participe ainsi à l'optimisation de l'ensemble de la chaîne d'exploitation du gaz;
- Le stockage du gaz permet aux producteurs, transporteurs et distributeurs d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande à un coût plus avantageux. Ils peuvent décider de stocker le gaz lorsque son prix est faible et le revendre ensuite lorsque le prix est plus élevé
- Placés près des zones d'exploitation, les sites de stockage permettent aux compagnies productrices de gaz de répondre à leurs objectifs de livraison. Premier producteur mondial de gaz, la compagnie russe Gazprom possède d'importants sites de stockage lui permettant d'assurer un approvisionnement continu et indépendant des problèmes liés aux capacités d'extraction et aux conditions climatiques. En 2009, les sites de stockage détenus par Gazprom correspondent environ à 25% du volume de gaz destiné à l'Europe.
- Placés près des zones de consommation, les sites de stockage permettent aux fournisseurs de gaz de gérer le taux d'utilisation du réseau de transport et de distribution tout en répondant efficacement à la demande.

Pour les pays producteurs, le stockage du gaz constitue une étape essentielle de l'exploitation du gaz naturel. Les États-Unis ont une capacité de stockage estimée à plus de 100 milliards de m³ et disposent d'environ 400 sites de stockage, la majorité étant des gisements épuisés. La Russie a une capacité de stockage de plus de 60 milliards de m³ et gère 25 sites de stockage (17 gisements épuisés et 8 nappes aquifères).

En Europe, les principaux pays consommateurs de gaz sont l'Allemagne, l'Italie, l'Autriche, et la France. Ils détiennent en 2009 plus de 22% de leur demande annuelle sous forme de stocks. En 2009, la capacité totale de stockage de l'Union européenne est esti-

mée à 80 milliards de m^3 . Les gisements épuisés sont le principal mode de stockage utilisé en Europe. Cependant, pour des raisons géologiques, la France privilégie le stockage en nappes aquifères.

Face à l'accroissement de la demande en gaz, le stockage joue un rôle primordial pour assurer les approvisionnements et répondre ainsi efficacement à la demande. Le développement des capacités représente un enjeu stratégique pour l'avenir du gaz dans le bouquet énergétique.

En 2020, l'Union européenne ne produira qu'un tiers de ses besoins énergétiques en gaz. Dès 2030, elle sera dépendante à plus de 80% des importations en gaz naturel. Afin de sécuriser les approvisionnements européens, 123 projets d'exploration et de mise en place de sites de stockage sont en cours. Cela permettrait d'accroître de 75 milliards de m^3 les capacités européennes de stockage.

4.6 Stockage d'électricité

4.6.1 Système de Transfert d'Énergie par Pompage – STEP

Ces installations comprennent, comme le montre la figure 4.1, des réservoirs situés à des altitudes différentes et un dispositif de pompage réversible permettant de transférer une masse d'eau entre eux et donc une énergie potentielle.

Il permet de stocker de grande quantité d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), type de centrale hydroélectrique, est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée: la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

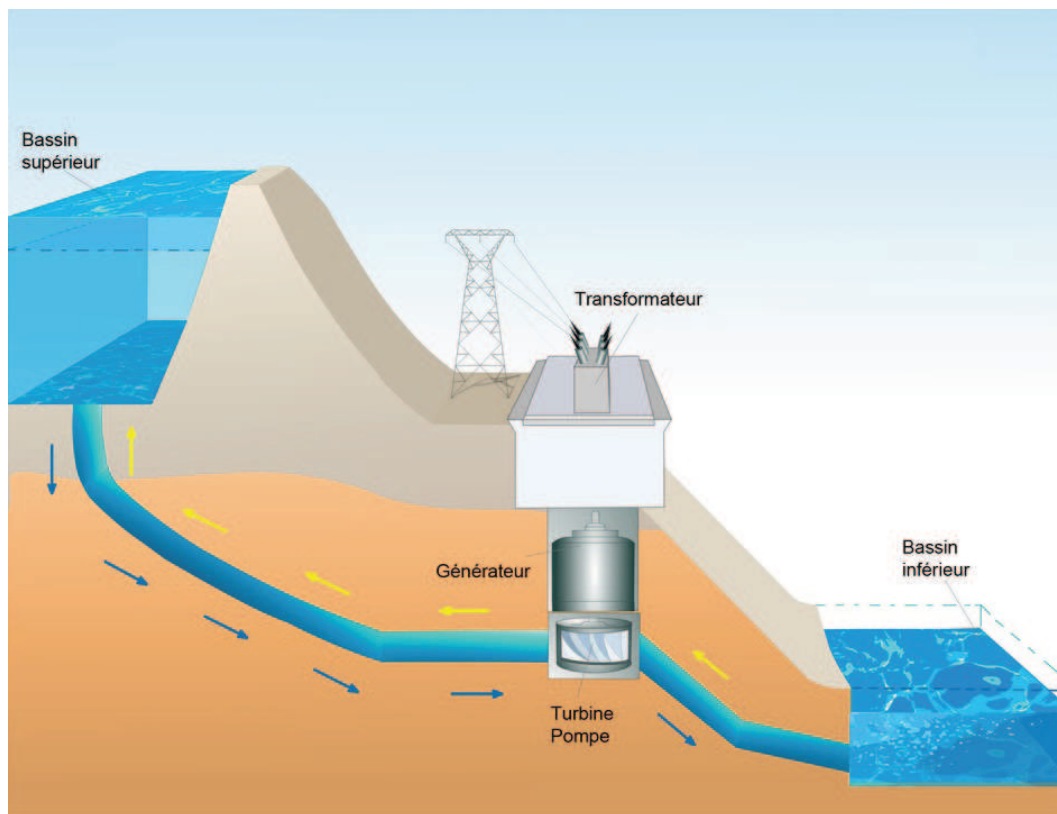


FIGURE 4.1 – Système de Transfert d'Énergie par Pompage – STEP

4.6.2 Stockage par air comprimé – CAES

L'électricité alimente un compresseur qui va comprimer de l'air ensuite stockée dans des cavernes souterraines. L'air circule ensuite des cavernes vers une turbine pour produire de nouveau de l'électricité.

Quand la demande d'électricité est faible, les systèmes existants utilisent d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. Le rendement, actuellement aux environs de 50%, est un axe de recherche et de développement. Le stockage à air comprimé à partir des énergies éolienne et solaire fait l'objet d'installations pilotes en Allemagne et aux États-Unis.



FIGURE 4.2 – Station de transfert d'énergie par pompage

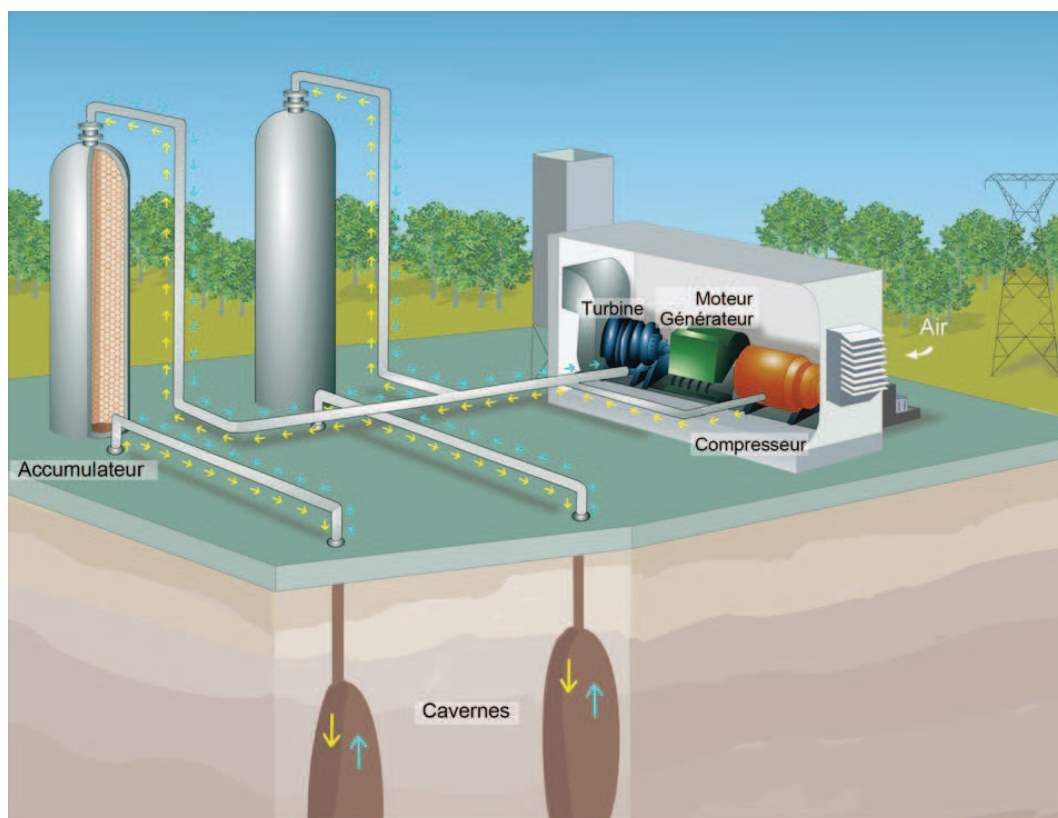


FIGURE 4.3 – Stockage par air comprimé – CAES

4.6.3 Vecteur hydrogène

L'électricité va permettre de produire, via un électrolyseur, de l'hydrogène. Le gaz est ensuite stocké soit sous forme liquide, solide ou gazeuse avant d'être consommé dans une pile à combustible. Re combiné à l'oxygène il va ainsi produire de l'eau et de l'électricité.

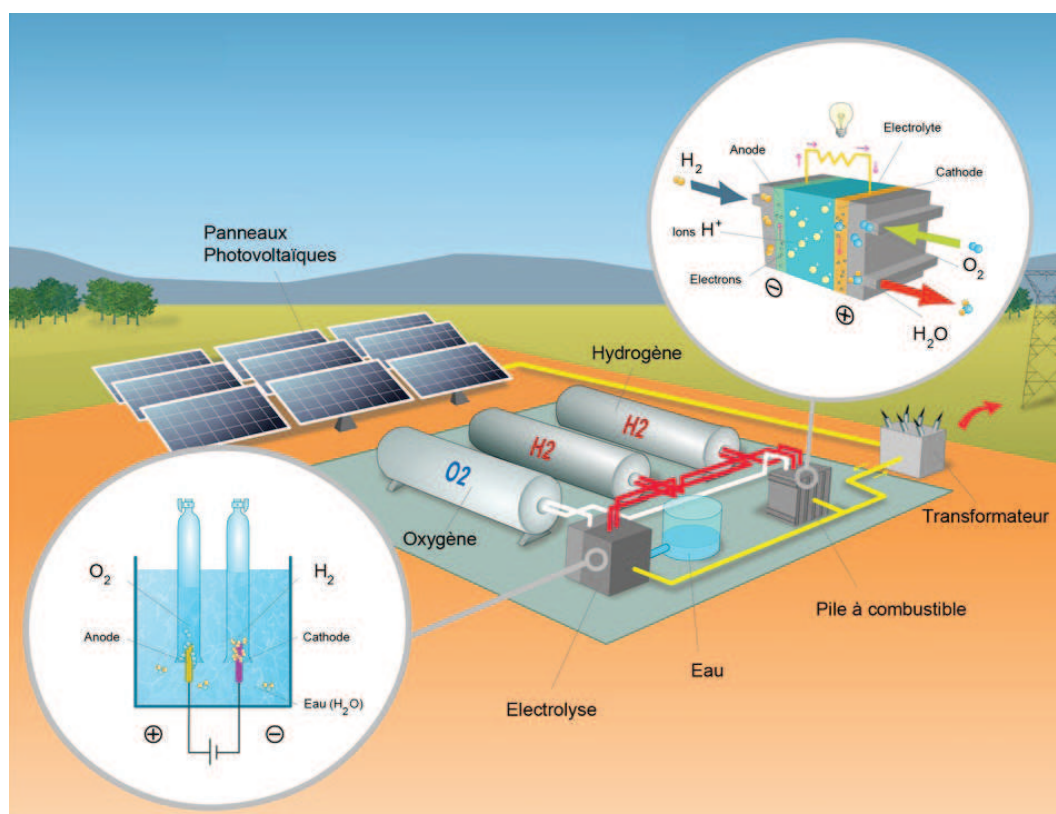


FIGURE 4.4 – Production et stockage de l'hydrogène

4.6.4 Les volants d'inertie

L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé. L'énergie cinétique entraînée par la rotation du cylindre peut ainsi être conservée. Cette énergie est ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur (principe de la dynamo).

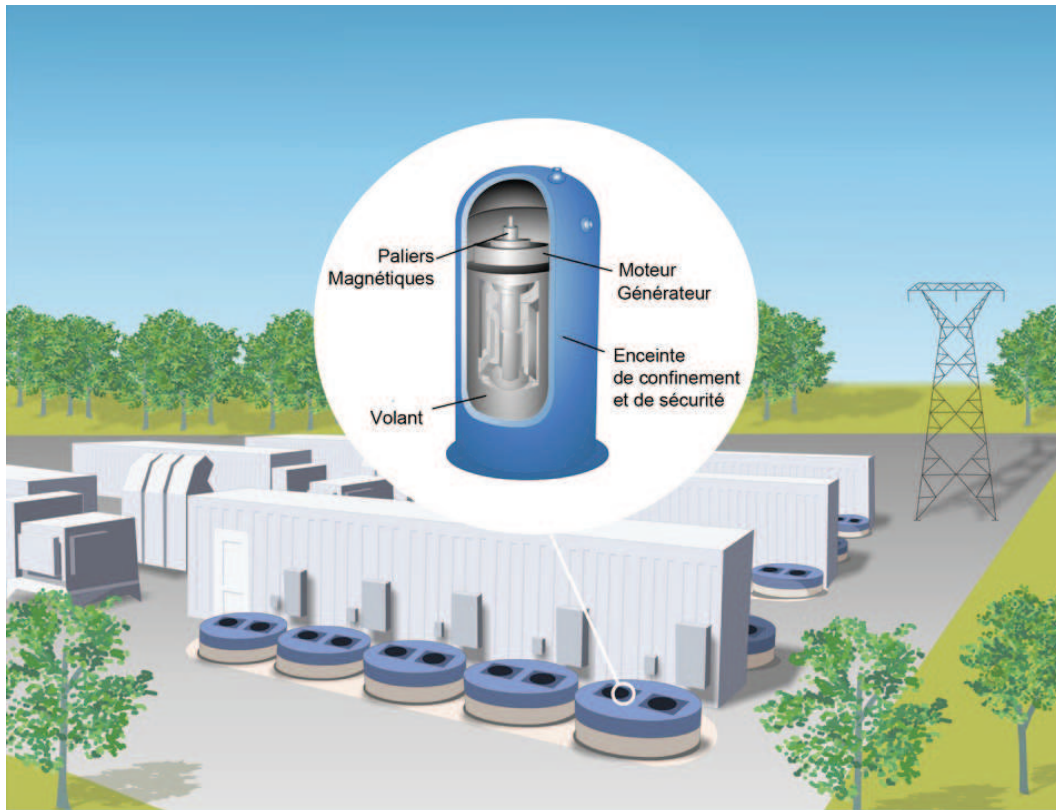


FIGURE 4.5 – Stockage par volants d'inertie

4.6.5 Les batteries

Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes.

Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries.

Technologies plomb-acide

Il existe une variété assez importante de technologies plomb-acide optimisées pour répondre à différentes exigences en termes de compromis durée de vie, coût d'investissement et constante de temps. Les électrodes sont principalement constituées, pour l'une, de plomb, et pour la seconde, d'oxyde de plomb tandis que l'électrolyte est un mélange d'acide sulfurique (SO_4) et d'eau. Les problèmes d'évaporation de l'eau, et d'électrolyse en cas de surcharge, conduisent à de fréquents besoins de maintenance (par exemple une fois par mois selon conditions de température sachant qu'une augmentation de $10\text{ }^\circ\text{C}$ mul-

tiplie par 5 la vitesse de perte d'eau) dans le cas des batteries ouvertes. En revanche, les batteries fermées de type VRLA (Valve Regulated Lead Acid) à soupape de sécurité et avec un électrolyte gélifié sont sans entretien, avec des durées de vie qui peuvent atteindre 20 ans.

Les batteries au plomb permettent également de proposer des solutions de stockage de masse avec des performances tout à fait honorables en termes de coût et de durée de vie, en particulier grâce à de récents développements.

Technologies à base de nickel:

Il s'agit des technologies nickel-cadmium (NiCd) et nickel métal-hydrures (NiMH), qui fournissent, dans les deux cas, une force électromotrice par élément d'environ 1.2 V. Les performances massiques sont jusqu'à deux fois plus élevées que celles du plomb acide et les performances en puissance peuvent être excellentes.

Les technologies NiCd: Après avoir satisfait la demande en petits accumulateurs pour les applications électroniques grand public, sont aujourd'hui bannies de ce domaine à cause de la toxicité du cadmium et ne sont autorisées que pour des usages professionnels.

Actuellement, cette technologie est typiquement utilisée dans les chariots de maintenance comme elle l'a été dans les véhicules électriques de la fin du 20^{ème} siècle.

La technologie NiMH: a remplacé partiellement celle de type NiCd sur le marché grand public. Elle permet de se passer du cadmium tout en augmentant l'énergie massique, passant de 60 à 80 Wh/kg, et en doublant quasiment l'énergie volumique. Elle sert également de *batterie de puissance* dans les chaînes de traction hybride de Toyota.

Les technologies lithium: Bien plus jeunes que les deux précédentes (apparition dans les années 1990, mais en petites capacités et puissances), sont nombreuses et nous nous restreignons ici à un très bref panorama de leurs caractéristiques majeures et de leurs applications. Nous considérons les technologies suivantes selon les cathodes (positives), sachant que les anodes (négatives) peuvent être de type carbone (LiC₆) ou titanates (LTO):

- NCA : Li(NiCoAl)O₂;
 - NMC : LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂;
 - LFP :LiFePO₄;
 - LMO : LiMn₂O₄ ou LiNi_{1/2}Mn_{3/2}O₄;
 - LMP : lithium métal polymère.
-

Selon les technologies, de 100 à 400 g de lithium métal sont requis par kWh de capacité de stockage. Les forces électromotrices d'un élément sont comprises entre 2.1 V (LFP-LTO) et 3.8 V (LMO-LiC), en passant par 3.3 V (LFP-LiC). Quant aux valeurs d'énergie massique, elles varient, respectivement pour des cellules seules ou pour des packs de grosse capacité, entre 70 ou 45 (technologie LFP-LTO) et 180 ou 120 Wh/kg (technologie NCA-LiC).

La technologie LMP, développée par très peu de fabricants, est entièrement solide et ne présente pas de risque d'explosion. Elle offre une densité d'énergie élevée d'environ 100 Wh/kg (en pack). Mais son principal inconvénient est sa température de fonctionnement optimale aux alentours de 60 à 80 °C.

Les technologies au lithium, largement utilisées pour les applications électroniques portables, ont nécessité d'importants développements pour réaliser des packs de fortes énergies et puissance.

Elles permettent aujourd'hui d'équiper les véhicules électriques avec des capacités énergétiques de dizaines de kWh ainsi que de réaliser des batteries de très grande capacité pour des applications réseau. La technologie LFP offre des performances exceptionnelles de durée de vie et de sécurité (pas de risque d'explosion ou d'inflammation en cas de défaillance).

4.6.6 Le stockage électromagnétique

Le stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES pour *Superconducting magnetic energy storage* (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice). Le SMES permet de disposer quasiment instantanément d'une grande quantité d'électricité, mais il ne pourra se généraliser tant que l'on n'arrivera pas à produire des aimants supraconducteurs performants, durables et moins coûteux. Il permet aujourd'hui, encore expérimentalement, de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu de très haute intensité dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique de transition vers l'état supraconducteur. Le champ magnétique est généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine constituée d'un matériau supraconducteur et court-circuitée qui devait être refroidie à 4 °K, soit - 269 °C dans les premiers modèles. Il suffit de connecter la bobine au réseau pour la décharger. Pour l'instant, le coût des équipements (et l'énergie requise pour la réfrigération) réservent ce type de stockage à des applications de hautes technologies, civiles ou militaires (lanceur électromagnétique...)

4.7 Stockage de la chaleur

4.7.1 Le stockage par chaleur sensible

qui consiste à chauffer un fluide caloporteur ou un solide. La chaleur est ensuite récupérée en chauffant un autre fluide. C'est le principe du ballon d'eau chaude, couplé à un panneau solaire thermique. C'est aussi tout simplement le cas d'une pierre posée près d'une cheminée. Une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur.

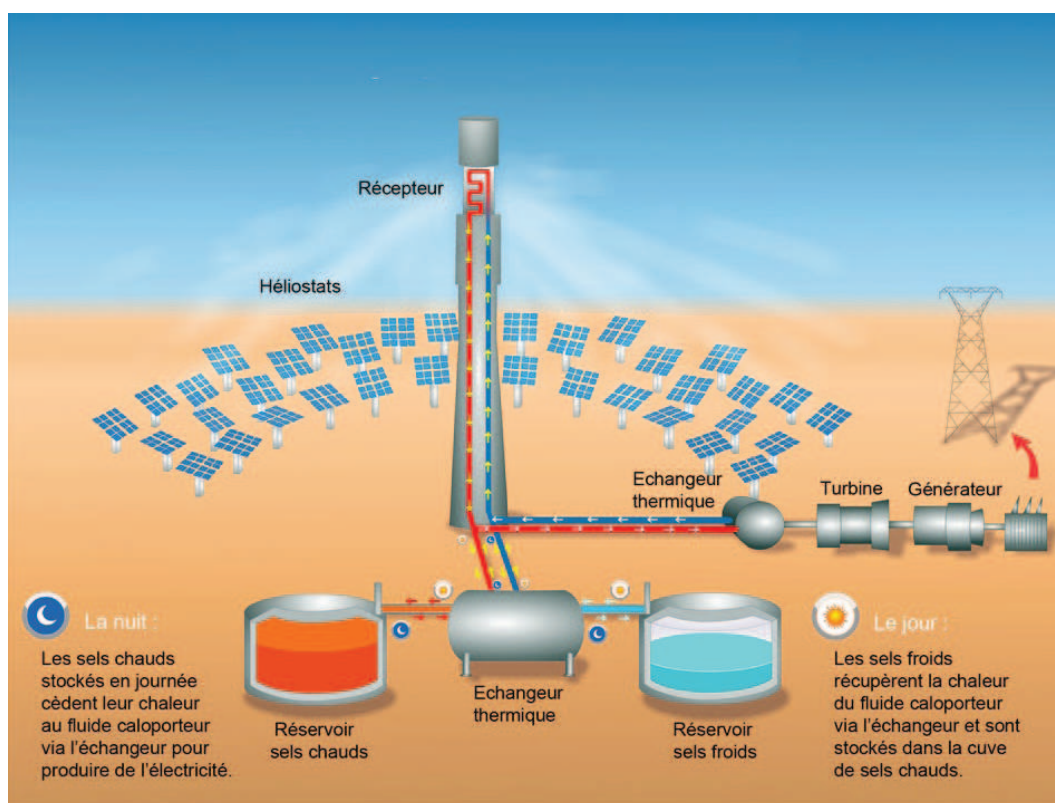


FIGURE 4.6 – Stockage par par chaleur sensible

L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie. Ce principe est, entre autres, celui des chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen de l'ordre de 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton.

Pour de grands volumes, la chaleur de capteurs solaires ou des rejets industriels peut être stockée dans le sous-sol. Le stockage géologique, pouvant être couplé à des opérations

de géothermie, est encore assez peu répandu.

4.7.2 Le stockage de chaleur par changement de phase

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). C'est le cas, par exemple, de la paraffine dont la température de fusion est proche des 70 °C. La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Cette technique peut être appliquée dans les bâtiments, par l'intermédiaire des Matériaux à Changement de Phase (MCP). Incorporés aux parois, ils servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil.

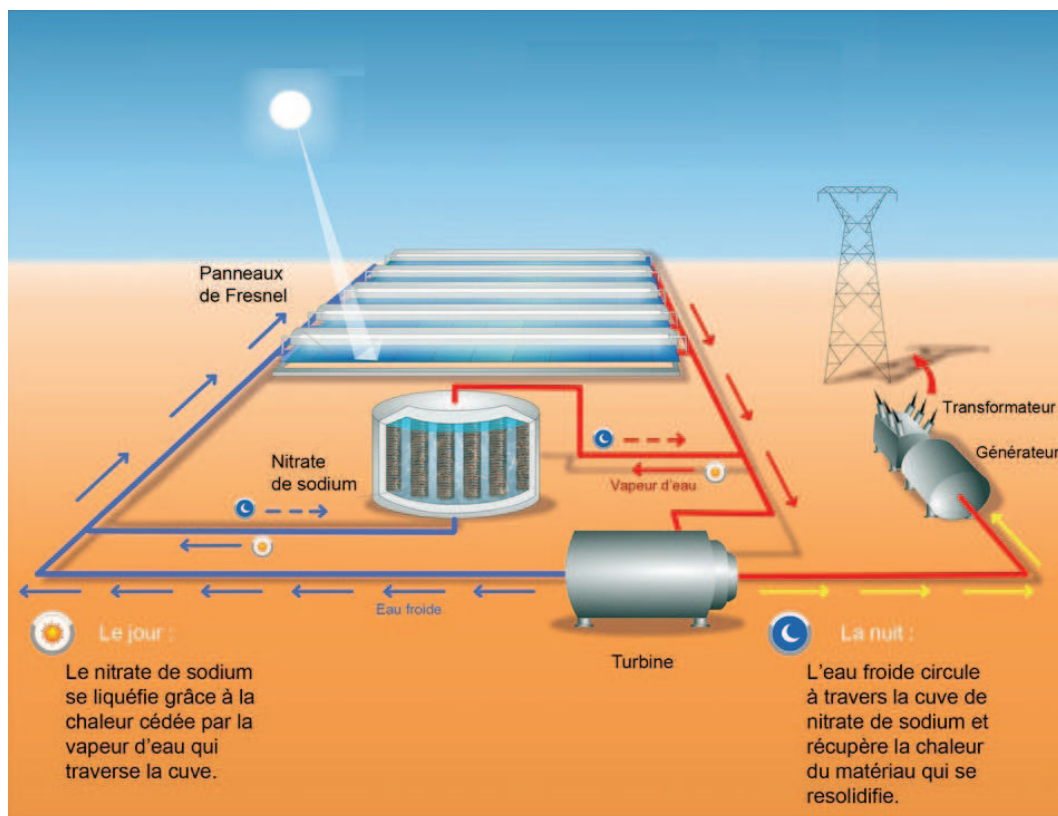


FIGURE 4.7 – Le stockage de chaleur par changement de phase

4.7.3 Le stockage de chaleur par réaction chimique

qui consiste en l'utilisation d'une réaction chimique réversible qui a besoin d'un apport de chaleur dans un sens (endothermique) et dégage de la chaleur dans le sens opposé (exothermique). Parmi les réactifs envisagés, la chaux. La chaleur apportée permet de

l'assécher (c'est-à-dire retirer l'eau du mélange). La chaux sèche est ensuite conservée à l'abri de l'humidité. Lorsqu'elle est ré-humidifiée, se produit alors un dégagement de chaleur qui peut être utilisé notamment dans l'habitat. La stabilité de ce système peut permettre un stockage saisonnier.

Si certaines technologies, comme les STEP, sont aujourd'hui matures, la plupart des technologies existantes nécessitent encore des améliorations afin de les rendre plus efficaces et compétitives. En effet, certains des besoins identifiés aujourd'hui, comme la couverture en électricité lors des périodes de pointe de consommation, sont principalement comblés par l'utilisation des énergies fossiles, émettrices de CO₂, dont le prix les rend encore attractives.

Les recherches sont donc essentielles pour :

- Trouver et utiliser des matériaux moins coûteux;
- Réduire la quantité de matériaux pour économiser les ressources naturelles;
- Pour les batteries, trouver des couples chimiques qui offrent de meilleures performances;
- Diminuer les pertes et donc augmenter le rendement;
- Anticiper sur les coûts d'installation et de maintenance.

L'impact environnemental est également une problématique à prendre en compte dans le choix de matériaux, dans l'encombrement de la technologie ou le lieu d'installation. Le développement de systèmes de gestion associés aux technologies de stockage est également déterminant. L'élaboration d'algorithmes permet notamment d'évaluer le système de stockage à associer à la production d'énergie et de simuler en temps réel le système combiné entre la production R et le système de stockage.

En combinant toutes les technologies de stockage de l'énergie envisagées ci-dessus il est possible, en théorie, de couvrir la majeure partie des besoins identifiés pour un mix énergétique intégrant une part importante d'énergies renouvelables. Mais la question du coût de construction de ces nouveaux équipements et de leur financement peut constituer un frein à leur développement.

Chapitre 5

Consommations, Réserves et Évolutions des Ressources d'Énergie

5.1 Introduction

La demande énergétique augmente régulièrement pour deux raisons:

- la première est liée à l'augmentation de la population mondiale. Il y a, chaque jour, presque 200 000 habitants supplémentaires sur la Terre [un peu plus de 350 000 naissances (4 par seconde) pour presque 160 000 décès];
- la seconde est l'augmentation du niveau de vie des pays en voie de développement qui ne peut se faire sans consommer de plus en plus d'énergie. Or, presque 2.8 milliards d'habitants vivent avec moins de 2 \$ par jour et la croissance de la demande énergétique se trouve et va surtout avoir lieu dans les pays en développement.

Ainsi, en une vingtaine d'années la Chine a augmenté sa consommation de pétrole de 190 % alors que cette augmentation n'a été que de 16 % aux États-Unis pour la même période.

La consommation mondiale d'énergie primaire est passée d'environ 1 Gtep en 1900 à 10 Gtep en 2000 (11.7 Gtep en 2006). On estime qu'elle devait être de 0.2 Gtep en 1800. L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie est bien supérieure à celle de la population qui est passée d'environ 1 milliard d'habitants en 1800 à 6.7 milliards aujourd'hui. Entre 1900 et 2000 la population mondiale a été multipliée par environ 3.6 alors que la consommation d'énergie a été multipliée par 10. Cette différence vient de ce qu'il y a eu simultanément une augmentation de la population mondiale et un accroissement du niveau de vie d'une grande partie des habitants de la planète.

Avec une croissance énergétique comme celle que l'on connaît depuis le début du siècle, d'environ 2 %/an, on devrait consommer 7 fois plus d'énergie en 2100 qu'en 2000. Cela ne peut être possible dans une civilisation utilisant majoritairement les combustibles fossiles

comme c'est le cas aujourd'hui.

Depuis environ deux siècles, le monde a connu une croissance importante en exploitant des ressources énergétiques concentrées et peu chères: les combustibles fossiles. La révolution industrielle a démarré grâce au charbon et l'évolution s'est poursuivie avec le pétrole et le gaz. Ce n'est que vers le début du 20^{ème} siècle que les combustibles fossiles ont supplanté les énergies renouvelables. Avec une énergie peu chère et abondante, l'Homme a pu consacrer toute son énergie à développer des domaines qui ont eut une importance capitale pour l'accroissement du niveau de vie de la population mondiale et sur ses conditions de vie.

Pour ce qui est de l'énergie, le monde actuel repose en grande partie sur les combustibles fossiles. Cela est illustré par la figure 5.1 qui montre, au niveau mondial pour l'année 2006, la répartition de l'énergie primaire entre les différentes sources d'énergie. On constate que les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représentent 80 % de cette consommation.

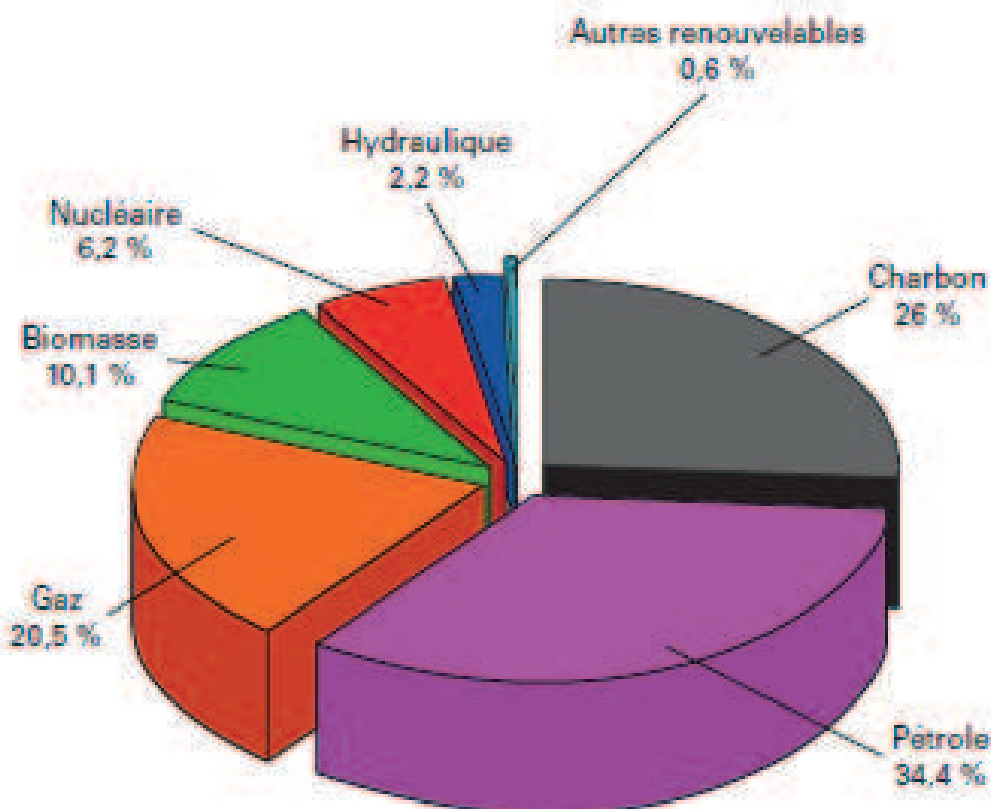


FIGURE 5.1 – Répartition de la Consommation de l'énergie

En évaluant la contribution d'une source d'énergie en tep, il y a une part d'arbitraire dont il faut prendre garde. Ainsi, au niveau de l'énergie primaire, le nucléaire contribue presque 3 fois plus que l'hydraulique (6.2 % contre 2.2 %). Or, l'hydraulique et le nucléaire, toutes deux utilisées pour générer de l'électricité, en produisent à peu près la même quantité (16 % de l'électricité mondiale est produite par l'hydraulique contre 14.8 % par le nucléaire). Ce facteur 3, au niveau de l'énergie primaire, vient de ce qu'une centrale hydraulique a un rendement de production électrique proche de 100 % alors qu'il n'est que de l'ordre du tiers pour les réacteurs nucléaires actuels.

La consommation d'énergie finale était de 8.1 Gtep en 2006 alors que la quantité d'énergie primaire consommée était de 11.7 Gtep. Cela représente une perte de 3,6 Gtep soit 30 %. La figure ?? montre la répartition de la consommation d'énergie finale selon les sources d'énergie.

L'ensemble des combustibles fossiles représente encore 78 % de l'énergie finale.

Les combustibles fossiles ont été formés il y a des centaines de millions d'années par la nature à partir de biomasse marine ou terrestre. Malheureusement, ils sont en quantités finies et seront un jour pratiquement épuisés. Cela peut être rapide si on les consomme abondamment ou plus lent si on est économe, mais, dans tous les cas, ils deviendront rares un jour. Notre civilisation reposant largement, en matière énergétique, sur de tels combustibles, il va falloir progressivement s'en passer et les remplacer par d'autres ressources. Aurons-nous fait cette transition avant qu'ils soient complètement épuisés (au sens économique du terme) ou irons-nous jusqu'à leur épuisement complet ? Nous n'avons pour le moment pas assez d'éléments pour répondre à cette question où d'autres facteurs que scientifiques et technologiques interviennent.

Nous sommes sans doute très près d'avoir épuisé la moitié du pétrole dit conventionnel. Il en reste environ 140 Gt ce qui, au rythme de la consommation actuelle, représente une quarantaine d'années. La planète va être de plus en plus dépendante du Moyen-Orient où se trouve une grande partie des réserves. La figure ?? illustre cela en montrant, par ordre décroissant, les 7 pays qui possèdent les plus grandes réserves. Les réserves de gaz naturel sont du même ordre de grandeur que celles du pétrole, mais comme on en consomme moins, elles peuvent durer plus longtemps. Notons qu'il est possible de fabriquer du pétrole à partir du gaz naturel. La Fédération de Russie et l'Iran sont les pays qui ont les plus grandes réserves comme le montre la figure ??.

C'est le charbon qui a les réserves les plus importantes. À ce titre c'est un combustible fossile d'avenir car il sera le dernier utilisable lorsque le pétrole et le gaz seront rares. Par ailleurs, il est important de noter qu'il est et qu'il sera possible de fabriquer du pétrole à partir du charbon mais au prix d'une pollution importante. La répartition du charbon dans le monde est différente de celle des hydrocarbures et du gaz naturel comme le montre

la figure ?? qui indique les 8 pays possédant les plus grandes réserves.

Il existe aussi des pétroles non conventionnels comme les extra-lourds, les schistes bitumineux ou les sables asphaltiques. Les réserves sont considérables, mais leur extraction demande plus d'énergie que pour le pétrole traditionnel et génère plus de pollution.

5.2 Le défi énergétique

Nous sommes confrontés aujourd'hui à un défi énergétique qui a deux volets avec des échelles de temps différentes pour répondre à deux contraintes de nature différente.

La première est la possibilité d'un changement climatique important dû à l'émission de gaz à effet de serre provenant des activités humaines. Il faut donc rapidement réduire les émissions de CO₂ en ayant de plus en plus recours à des sources d'énergie décarbonées, c'est-à-dire qui n'en n'émettent pas en fonctionnement. Pour le moment, ces sources se réduisent à l'énergie nucléaire et aux énergies renouvelables. Ces dernières ont aujourd'hui une contribution mineure au bilan énergétique. Une autre solution consiste en la capture et le stockage de CO₂ dans des installations centralisées utilisant des combustibles fossiles. Cette solution est à l'étude et quelques démonstrateurs en vraie grandeur existent mais cela restera quantitativement marginal car il faudrait, pour simplement stocker une dizaine de pour cents des émissions en surplus par rapport à ce que la nature peut absorber, être capable de construire environ 1 400 centrales de capture et de stockage de CO₂ d'une capacité de 1 Mt de CO₂/an. Capturer et stocker quelques pour cents du CO₂ mondial émis à l'horizon 2050 serait déjà un succès mais c'est insuffisant pour résoudre le problème des émissions auquel nous sommes confronté à l'échelle de la planète.

La deuxième contrainte vient du fait que l'économie mondiale repose en grande partie sur les combustibles fossiles qui sont épuisables. À la fin du siècle, le pétrole et le gaz seront plus rares puis ce sera plus tard le tour du charbon. Il faut donc progressivement apprendre à se passer des combustibles fossiles mais l'échelle de temps pour le faire est plus longue que celle liée à la problématique de l'augmentation de l'effet de serre.

Compte tenu de ces deux contraintes, le défi énergétique du 21^{ème} siècle a deux volets:

- réduire les émissions de CO₂;
 - remplacer progressivement les énergies fossiles par des sources d'énergie décarbonées.
-