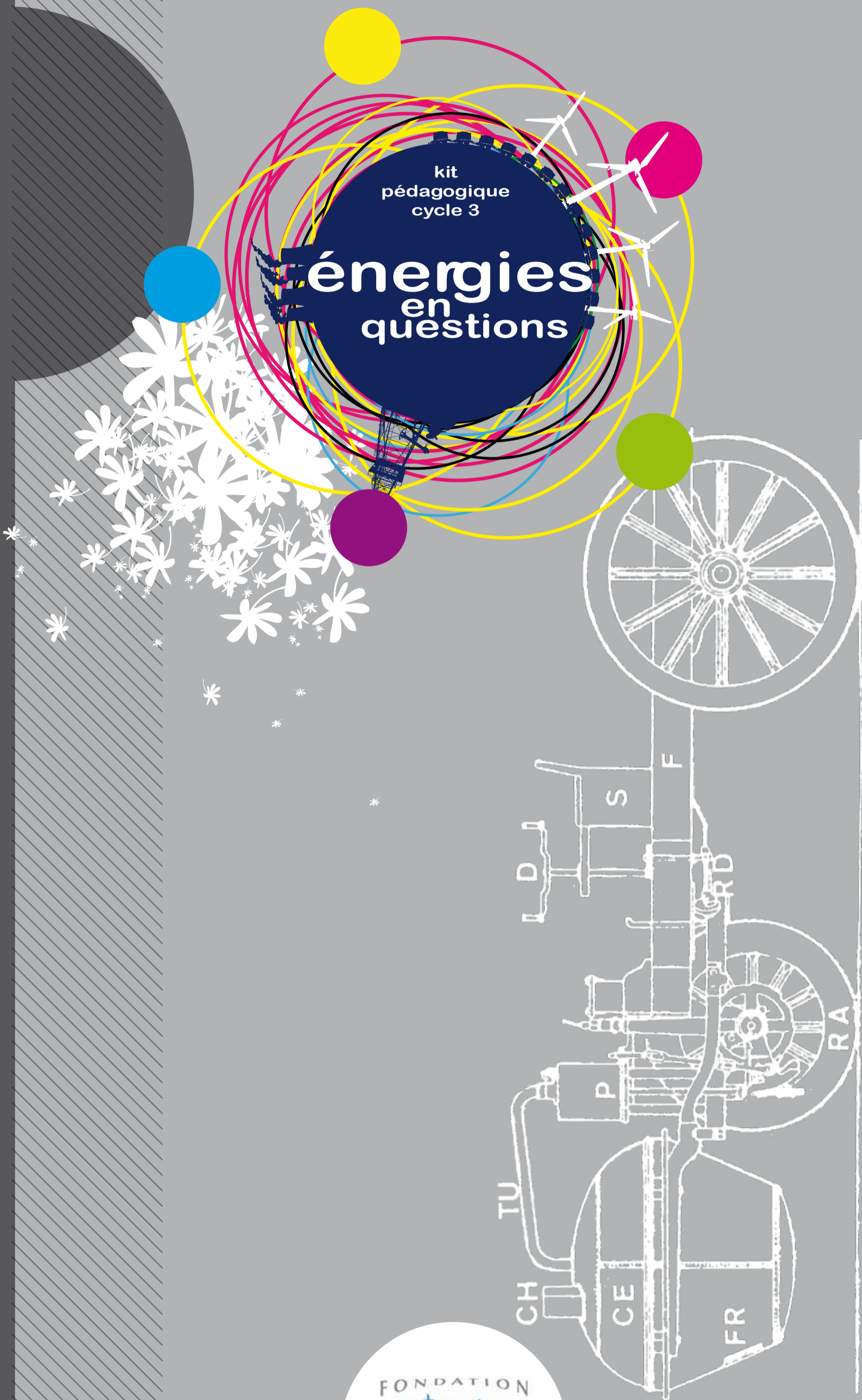


PETITE "ENCYCLOPEDIE"



FONDATION
entreprise
réussite scolaire
Partageons pour l'avenir de nos enfants



Edito

Aborder, même de manière intuitive, le domaine de l'énergie nécessite de faire appel à quelques notions de physique et de technologie. N'aborder le domaine de l'énergie qu'à travers ces deux seuls aspects serait cependant notoirement insuffisant.

L'énergie est au centre des préoccupations de l'Humanité. Préoccupations qui doivent être examinées et sans cesse ramenées à l'échelle de la planète, sans se limiter aux seules préoccupations concernant nos propres besoins et notre environnement immédiat, celles de notre pays ou même celles de l'Europe.

Les préoccupations de l'Humanité sont multiples. Elles concernent en premier lieu la satisfaction des besoins, notamment ceux des populations les plus démunies pour lesquelles l'énergie est d'abord synonyme d'amélioration de la durée et de la qualité de vie (diminution de la pénibilité des tâches, accès à l'eau, amélioration de l'hygiène et de la santé publique...).

En second lieu elles concernent le partage des ressources, l'accès et le coût de l'accès à ces ressources, la pérennité et la sécurité des approvisionnements.

Enfin, face à une consommation d'énergie toujours plus importante, des préoccupations nouvelles sont apparues, liées à la gestion des déchets et aux conséquences à long terme des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

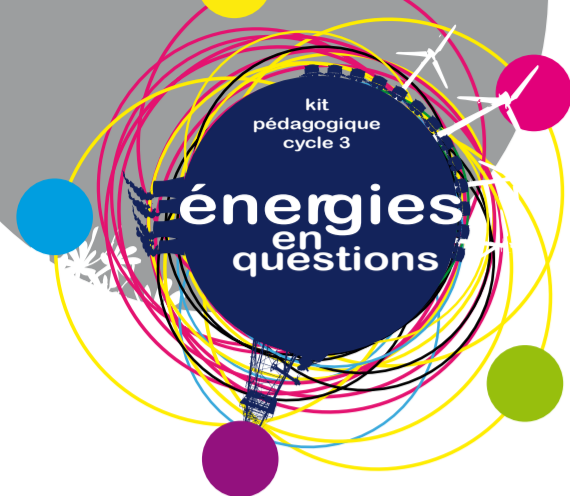
Ces préoccupations deviennent de plus en plus prégnantes bien que beaucoup de pays, et parmi eux les plus gros consommateurs et émetteurs, ne semblent pas en avoir encore bien perçu ni l'importance ni l'urgence.

L'objet de ce petit guide, un peu « touche à tout », auquel, par ironie, nous avons pompeusement donné le nom d'Encyclopédie, est d'apporter un certain nombre d'éléments d'ordre technique, économique et social permettant d'avoir une meilleure compréhension de ces sujets et surtout d'alimenter et de développer l'esprit critique de chacun au regard des solutions avancées pour résoudre les multiples problèmes posés par le devenir énergétique de notre planète.

Ce guide accompagne un matériel pédagogique sur l'énergie. Ce matériel et le guide ont été élaborés par une équipe composée d'enseignants de l'école primaire et de bénévoles venus de divers horizons.

Le secret espoir de l'équipe est le même que celui qui a animé les fondateurs du mouvement « La main à la pâte », Georges Charpak, Pierre Léna, Yves Quéré et bien d'autres. Il est de dissiper les appréhensions face aux sciences, susciter la curiosité, faire toucher du doigt l'essence du monde qui nous entoure, partager sa découverte et, si possible, en faire apprécier la secrète harmonie.

Fondation Entreprise
Réussite Scolaire



Généralités

Introduction (pages 6-9)

- 1) QUELQUES REPÈRES
- 2) UTILISATION, AVENIR DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES
- 3) ÉNERGIES CARBONÉES ET ENVIRONNEMENT
- 4) EN GUISE DE CONCLUSION

Quelques notions de physique (pages 10-17)

- 1) ÉNERGIE = FORCES EN ACTION
- 2) NOTION DE TRAVAIL
- 3) LES FORCES FONDAMENTALES DE L'UNIVERS
- 4) ÉQUIVALENCE ENTRE LA MATIÈRE ET L'ÉNERGIE
- 5) UN PEU DE THÉORIE... ACCESSIBLE
- 6) QUELQUES CURIOSITÉS ET COMPLÉMENTS UTILES

Le Soleil (pages 18-19)

- 1) LE SOLEIL SOURCE D'ÉNERGIE ET DE VIE
- 2) LE SOLEIL, FORMATION, FONCTIONNEMENT
- 3) LA LUMIÈRE ÉMISE PAR LE SOLEIL
- 4) L'ÉNERGIE REÇUE PAR LA TERRE
- 5) L'EFFET DE SERRE

Les Unités (pages 20-21)

- 1) LES GRANDEURS FONDAMENTALES
- 2) LES UNITÉS LÉGALES
- 3) MULTIPLES ET SOUS MULTIPLES
- 4) RADIOACTIVITÉ, EFFETS RAYONNEMENTS IONISANTS

Les systèmes énergétiques (pages 22-25)

- 1) LES ÉNERGIES PRIMAIRES
- 2) ÉNERGIES RENOUVELABLES, NON RENOUVELABLES
- 3) ÉNERGIE DE STOCK, ÉNERGIE DE FLUX
- 4) TRANSFORMATIONS, CONVERSION DES ÉNERGIES PRIMAIRES
- 5) ÉNERGIE FINALE, ÉNERGIE UTILE, RENDEMENTS
- 6) CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE
- 7) NOTIONS SUR LA MAÎTRISE D'ÉNERGIE

Les énergies renouvelables

La biomasse (pages 26-29)

- 1) DÉFINITIONS, CARACTÉRISTIQUES
- 2) POTENTIEL MONDIAL
- 3) POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT
- 4) MODES D'EXPLOITATION À DES FINS ÉNERGÉTIQUES
- 5) L'INCINÉRATION DES DÉCHETS

L'énergie éolienne (pages 30-33)

- 1) RIEN DE NOUVEAU SOUS LE SOLEIL !
- 2) QUELQUES CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES
- 3) LE POTENTIEL ÉOLIEN
- 4) INTERMITTENCE DE LA PRODUCTION ÉOLIENNE
- 5) L'ÉOLIEN OFF-SHORE
- 6) INTERMITTENCE ET STOCKAGE D'ÉNERGIE
- 7) CONCLUSION

L'énergie solaire (pages 34-37)

- 1) L'ENSOLEILLEMENT, L'ÉNERGIE REÇUE
- 2) LE SOLAIRE THERMIQUE
- 3) LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie géothermique, pompes à chaleur (pages 38-41)

- 1) UN PEU DE GÉOLOGIE
- 2) L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE
- 3) LES POMPES À CHALEUR

L'énergie hydraulique (pages 42-45)

- 1) INTRODUCTION
- 2) L'HYDRAULIQUE TERRESTRE, LES CENTRALES
- 3) L'HYDRAULIQUE MARINE
- 4) LE COÛT DE LA PRODUCTION HYDRAULIQUE
- 5) AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'HYDRAULIQUE

Les énergies fossiles

Définitions, formation (pages 46-48)

- 1) DÉFINITIONS ET GÉNÉRALITÉS
- 2) CLASSIFICATION
- 3) FORMATION DES HYDROCARBURES
- 4) FORMATION DES CHARBONS

Utilisation et consommation (pages 49-50)

- 1) INTRODUCTION
- 2) RESSOURCES ET RÉSERVES
- 3) ACCROISSEMENT DES BESOINS ET DE LA DEMANDE

Le pétrole (pages 51-53)

- 1) LE PÉTROLE EN QUELQUES CHIFFRES
- 2) LES RÉSERVES
- 3) PÉTROLE CONVENTIONNEL, PRODUCTION, CONSOMMATION
- 4) LES RÉSERVES NON-CONVENTIONNELLES
- 5) PERSPECTIVES DE CONSOMMATION (2011)

Le gaz naturel (pages 54-56)

- 1) LA PRODUCTION DU GAZ NATUREL
- 2) LES RÉSERVES CONVENTIONNELLES
- 3) LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL
- 4) LES GAZ NON-CONVENTIONNELS
- 5) LES HYDRATES DE MÉTHANE

Le charbon (pages 57-59)

- 1) MINES ET GISEMENTS
- 2) LA PRODUCTION MONDIALE
- 3) ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION
- 4) LES USAGES DU CHARBON ET DU LIGNITE
- 5) LE LIGNITE

L'énergie nucléaire

Quelques définitions (pages 60-61)

- 1) ÉLÉMENT NATUREL
- 2) ATOME
- 3) ISOTOPE
- 4) STABILITÉ DES NOYAUX ATOMIQUES, RADIOACTIVITÉ
- 5) PÉRIODE RADIOACTIVE
- 6) ÉLÉMENTS RADIOACTIFS
- 7) RÉSUMÉ

La réaction de fission (pages 62-65)

- 1) LA RÉACTION DE FISSION EN CHAÎNE
- 2) LES DEUX URANIUMS, BILAN DE LA RÉACTION
- 3) LES PRODUITS RÉSULTANT DE LA FISSION

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire (pages 66-69)

- 1) SCHÉMA DE PRINCIPE
- 2) FONCTIONNEMENT ET SÛRETÉ DES RÉACTEURS
- 3) LES RÉACTEURS DE QUATRIÈME GÉNÉRATION

Les déchets nucléaires (pages 70-71)

- 1) MATIÈRES RECYCLABLES ET DÉCHETS ULTIMES
- 2) CLASSIFICATION DES DÉCHETS, RADIOTOXICITÉ DES ACTINIDES
- 3) LES ACTINIDES, SÉPARATION, RECYCLAGE

Les réserves d'uranium et de thorium (pages 72-75)

- 1) LE VOYAGE DE L'URANIUM DEPUIS LE CENTRE DE LA TERRE
- 2) LES RÉSERVES D'URANIUM
- 3) CONCLUSION

Les enjeux environnementaux

La machine climatique (pages 76-77)

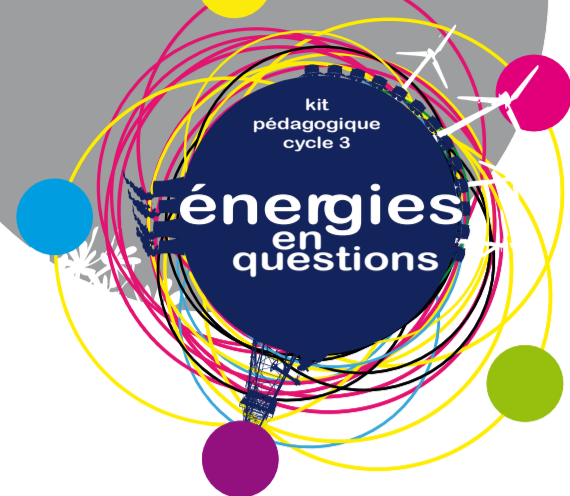
- 1) LES IDÉES FONDAMENTALES
- 2) LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE
- 3) LA CIRCULATION AU SEIN DES OCÉANS
- 4) LES ÉCHANGES D'ÉNERGIE ENTRE L'ATMOSPHÈRE ET LES OCÉANS
- 5) LES ÉCHANGES GAZEUX ENTRE LES OCÉANS ET L'ATMOSPHÈRE

L'effet de serre (pages 78-82)

- 1) UN PHÉNOMÈNE COMPLEXE DIFFICILE À APPRÉHENDER
- 2) BILAN DES ÉCHANGES D'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE DE LA PLANÈTE
- 3) LES GAZ À EFFET DE SERRE
- 4) LA PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DE SERRE

Le gaz carbonique, émission, séquestration (pages 83-85)

- 1) LES REJETS DE GAZ CARBONIQUE DANS L'ATMOSPHÈRE
- 2) LES ÉMISSIONS DE CO₂, UNE TENDANCE CONSTANTE À LA HAUSSE
- 3) LES SOLUTIONS PROPOSÉES, CAPTAGE ET SÉQUESTRATION
- 4) LES LIMITES ACTUELLES DE LA CAPTATION ET DE LA SÉQUESTRATION DU CO₂



Introduction

1) Quelques points de repère

1-1 PREMIER CONSTAT

1 Accroissement de la population mondiale

Indépendamment de toute considération d'ordre politique, économique ou idéologique, un premier constat s'impose à tous : au cours de ce XXI^{ème} siècle la demande énergétique ira en s'amplifiant. Elle s'amplifiera sous l'effet conjugué de l'accroissement de la population des pays dits émergents et de la nécessité de procurer de l'énergie aux populations des pays qui actuellement en consomment peu ou quasiment pas (voir figure 2).

Consommation annuelle :

Islande :	28 300 kWh
Etats Unis :	13 300 kWh
France :	8 170 kWh
Chili :	3 100 kWh
Chine :	1 600 kWh
Inde :	460 kWh
Haïti :	30 kWh

2 Disparité de la consommation d'énergie en KW/h par habitant

Manifestement l'accroissement des besoins en énergie de la population de ces pays sera beaucoup plus important que la diminution de la consommation des pays de l'OCDE, dits « riches »... à supposer que ces derniers veuillent et sachent réduire effectivement leur consommation. A l'échelle de la planète, au moins pendant la première moitié de ce siècle et malgré les louables efforts de certains, les besoins en énergie continueront à augmenter.

1-2 SECOND CONSTAT

L'énergie est indispensable à la vie. Avant d'évoquer et de condamner à juste titre les excès et les gaspillages, il est important de souligner ce que la plupart d'entre nous ignore ou a oublié, la consommation d'énergie est directement liée à l'espérance de vie et à sa qualité.

L'explication en est fort simple : espérance de vie et qualité de vie sont étroitement liées à la diminution de la pénibilité et de la dangerosité des tâches, à l'augmentation de l'hygiène (distribution d'eau potable, existence de sanitaires, traitement et épuration des eaux usées...) et à la libération d'une partie du temps consacré au travail et aux corvées en faveur de l'éducation, du repos, voire des loisirs.

Évolution de l'espérance de vie à la naissance en France de 1740 à 2005



3 Evolution de l'espérance de vie à la naissance en France de 1740 à 2005

Si l'évolution de l'espérance de vie et l'amélioration des conditions de vie sont intimement liées aux progrès de la médecine, de la science et de la technologie, les statistiques montrent qu'elles sont également tributaires de la mise à la disposition des personnes d'une quantité minimum d'énergie.

En France, l'espérance de vie (figure 3) est passée de 45 ans en 1900 à 81 ans en 2009. Elle augmente encore actuellement d'un an tous les quatre ans. Un tiers de cette augmentation est imputable aux progrès de la médecine, les deux autres tiers à l'amélioration des conditions de vie.

Pour se convaincre de la relation existant entre espérance de vie, qualité de vie et consommation d'énergie, il suffit de se reporter à l'évolution de l'humanité et d'évoquer l'esclavage, la traite des Noirs, le travail des enfants dans les mines (des pratiques que l'on rencontre encore malheureusement de nos jours dans les pays les plus désertés)... etc.

Sans avoir à rappeler le passé, les figures 4 et 5 nous ramènent aux réalités quotidiennes actuelles des pays faiblement dotés en ressources énergétiques, au temps consacré aux corvées répétitives (portage de l'eau, collecte du bois pour la cuisson...), à la pénibilité de ces tâches.



4 Corvée de l'eau, la remontée au village (Ethiopie, 2012)

5 Collecte du bois mort pour la cuisine Lac Tana (Ethiopie, 2012)

1-3 ÉNERGIE, EAU POTABLE, HYGIÈNE ET SANTÉ PUBLIQUE

Une faible consommation d'énergie est très souvent associée à des difficultés d'approvisionnement en eau potable, y compris dans les contrées où l'eau n'est pas une ressource rare.

Sur notre planète, deux milliards de personnes n'ont pas accès à l'électricité. Sur notre planète, la moitié de l'humanité n'a pas un accès permanent à une eau potable ou à des toilettes privées, un tiers de l'humanité est contraint de déféquer dans la nature.

Parmi cette population, 1,9 milliards de personnes utilisent régulièrement une eau dangereuse pour leur santé.

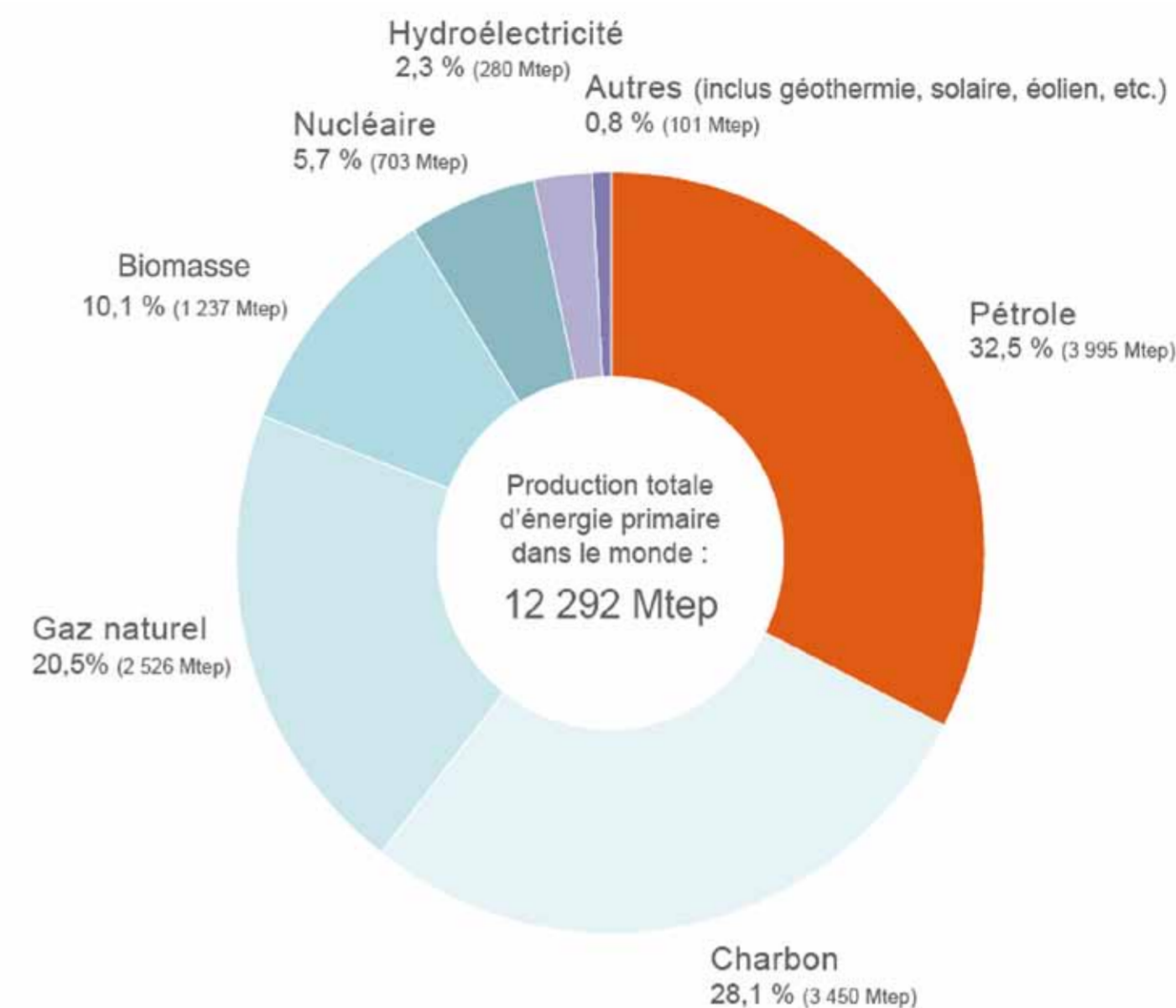
Sur notre planète, 80% des eaux usées ne sont ni collectées ni traitées et sont rejetées directement dans la nature polluant nappes et rivières. D'un point de vue sanitaire, le manque d'eau potable et d'assainissement constitue un fléau. On estime à 5 000 le nombre d'enfants qui meurent chaque jour de diarrhée (Forum mondial de l'eau, Marseille mars 2012).



6 Fourniture d'eau potable, station de pompage. Un idéal auquel beaucoup de pays aspirent encore © GDF SUEZ / Antoine Meyssonnier

1-4 DE COMBIEN « D'ESCLAVES » ÉNERGÉTIQUES CHACUN D'ENTRE NOUS DISPOSE-T-IL ?

Imaginons un instant, qu'aujourd'hui en France, il nous faille recourir à l'esclavage pour effectuer les multiples tâches dont nous nous déchargeons en les « confiant » aux commodités de toutes sortes : machines, moyens de transport, automatismes, appareils ménagers ou informatisés... tous grands consommateurs d'énergie sous diverses formes.



7 Les sources d'énergie primaire dans le monde, 2009 en Millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep)

La figure 2 montre que, toutes sources d'énergie confondues, énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), énergies renouvelables et énergie nucléaire, chaque Français consomme en moyenne l'équivalent de 8 170 kWh par an.

L'année comportant 8 760 heures, on en déduit qu'une puissance de près d'un kilowatt est en permanence à sa disposition et « travaille » pour lui, sans qu'il s'en rende compte, 24 heures sur 24 et 365 jours sur 365.

Si ce travail devait être accompli par la seule force de travail d'esclaves mis à sa disposition... c'est à une petite cinquantaine d'esclaves que chaque Français devrait en moyenne faire appel pour accomplir toutes ces tâches !

L'image est simpliste, grossière et sans doute même un peu racoleuse diron certains, mais elle a le mérite de nous montrer que l'énergie que nous « consommons » correspond à 50 ou 100 fois la quantité d'énergie (de travail musculaire) que notre corps est capable de fournir de manière continue.

2) L'utilisation et l'avenir prévisible des ressources énergétiques fossiles

2-1 LES SOURCES D'APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE

Toutes sources d'énergie confondues (figure 7) l'humanité consomme annuellement une énergie équivalente à celle que produirait la combustion d'environ 12 milliards de tonnes de pétrole. Pour sa part la France consomme l'équivalent de 277 millions de tonnes de pétrole. Pour permettre une comparaison entre sources d'énergie on exprime fréquemment les quantités d'énergie en « tonnes équivalent pétrole », la « tep », en millions de tep (mégatep ou Mtep) et milliards de tep (gigatep ou Gtep)

Au niveau mondial les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz) représentent aujourd'hui 83% des énergies primaires consommées.

Les énergies primaires (voir le chapitre qui leur est consacré « Systèmes énergétiques ») sont les ressources d'énergie dont l'humanité dispose avant que ne soient effectuées les transformations qui les rendent commercialisables et directement utilisables par un consommateur final.

Ce sont : les énergies renouvelables (soleil, vent, géothermie), le pétrole brut, le gaz naturel, les charbons, les matières fissiles (uranium et thorium).

7 Les sources d'énergie primaire dans le monde, 2009

La provenance de l'énergie dite primaire est la suivante :

- pétrole	33 %
- charbon	28 %
- gaz	20 %
- énergies renouvelables	11 %
- nucléaire	6 %
- autres sources	2 %

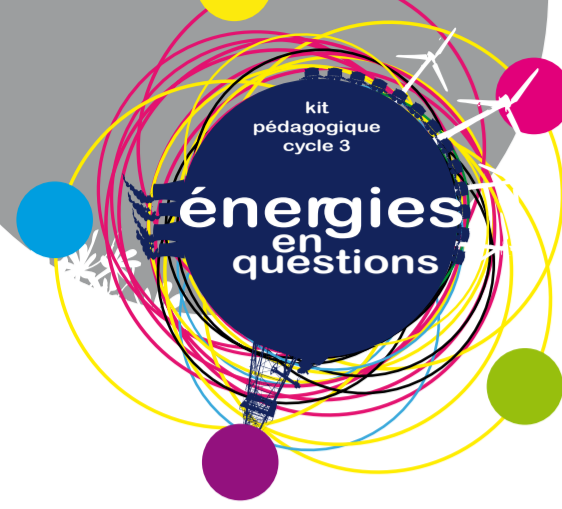
Jusqu'à présent l'accroissement de la consommation d'énergie a essentiellement reposé sur l'emploi des combustibles fossiles, ressources énergétiques bon marché et d'accès relativement facile. Ces temps d'abondance et de facilité sont aujourd'hui révolus. Les causes premières en sont d'une part l'épuisement à terme des ressources d'accès aisé, et donc à faible coût, et d'autre part la rivalité et la concurrence de plus en plus vive, voire conflictuelle, entre pays ou entre continents pour accéder à ces ressources qui se raréfient alors que les besoins augmentent.

1 Accroissement de la population mondiale



5 Collecte du bois mort pour la cuisine (Ethiopie, 2012)





2-2 LES RESSOURCES ET LES RÉSERVES

Il convient tout d'abord de préciser ces deux notions, elles ne doivent pas être confondues (voir au chapitre « utilisation des énergies fossiles » les paragraphes qui leur sont consacrés). On appelle **ressources** les quantités de matériaux utilisables à des fins énergétiques que l'on a découverts et identifiés sur Terre. Les **réserves** sont la partie des ressources que l'on estime aujourd'hui techniquement et économiquement possible d'exploiter.

A titre d'exemple, les ressources identifiées de charbon et de lignite sont de 5 500 milliards de tonnes, on estime les réserves (la partie des ressources actuellement exploitable) à seulement 900 milliards de tonnes pour le charbon et à 1 160 milliards de tonnes pour le lignite.

Autre exemple, actuellement et en moyenne, on n'extrait que le tiers des ressources de pétrole contenues dans les gisements, les deux autres tiers sont laissés en place. Dans le futur, les techniques et les conditions économiques évoluant, et en fonction des besoins, il sera peut être jugé techniquement possible et économiquement intéressant d'exploiter le pétrole actuellement laissé en place.

L'importance d'une réserve dépend donc des critères techniques et économiques que l'on retient à un moment donné pour l'évaluer. Non seulement ces critères évoluent dans le temps mais, de plus, ils sont variables d'un pays à l'autre en fonction des intérêts économiques, politiques ou stratégiques de chacun d'entre eux, des législations mises en place... ce qui rend particulièrement complexe et confus l'évaluation des réserves.

2-3 LES ÉNERGIES FOSSILES

Les énergies fossiles, pétrole, gaz et charbons se sont formées pendant des centaines de millions d'années au cours des âges géologiques, certaines depuis plus de 500 millions d'années. Concernant les énergies fossiles, pétrole, gaz ou charbon, on consomme chaque année ce que la nature a mis environ un million d'années à produire...

De toute évidence au rythme actuel de leur consommation, les réserves s'épuisent infiniment plus vite qu'elles se sont formées ou se forment encore actuellement.

Quelle est l'importance des réserves de ces énergies fossiles ?

Comme évoqué précédemment, pour une multitude de raisons, techniques, stratégiques, financières ou spéculatives, il est extrêmement difficile d'en connaître l'ampleur.

Tout d'abord de quelles réserves parle-t-on ? Des réserves certaines et prouvées ou des réserves plus hypothétiques, escomptées, spéculatives, ultimes ? S'agit-il de réserves aujourd'hui exploitables, réserves dites « **conventionnelles** », ou non exploitables, réserves dites « **non conventionnelles** », l'appellation variant considérablement d'un pays à l'autre selon la volonté de chacun de les exploiter ou de les laisser en place ?

L'exploitation du gaz de schiste illustre parfaitement la différence de perception pouvant exister entre les Etats quant à la notion de réserve « conventionnelle » ou de « non conventionnelle ». A titre d'exemple, la différence de perception entre les USA qui les exploitent massivement et la France... actuellement « très réservée » !

L'évaluation des réserves est donc le domaine de la « haute stratégie », voire du bluff et de l'intoxication, où le flou est volontairement entretenu par les différents acteurs du secteur énergétique, par les états producteurs ou consommateurs, les financiers, les bourses, les grandes compagnies du secteur énergétique et l'innombrable armée des intermédiaires et des spéculateurs.

Pour ne rien simplifier, lorsqu'on parle de réserves n'oublions pas qu'il convient de toujours préciser le prix auquel on accepte de payer l'accès à telle ou telle ressource énergétique. Sans cette précision concernant le prix, les chiffres avancés n'ont aucune signification. Pour reprendre l'exemple des ressources et des réserves pétrolières, en exagérant à peine, le pétrole « facile » à 10 \$ le baril est totalement épuisé, par contre le pétrole difficile à extraire existe en abondance... à la condition d'accepter de le payer 200, 300 \$ ou plus le baril ou d'accepter les conséquences pour la planète de l'exploitation de certaines ressources dites « non conventionnelles » dont certaines sont particulièrement polluantes.

Submergé par l'avalanche des données partielles ou contradictoires et des avis (qui le sont tout autant !), le pauvre consommateur que nous sommes est bien en peine de se forger une idée précise sur l'évaluation du volume des ressources et des réserves mondiales. La seule certitude qu'il puisse avoir est que, compte tenu de leur raréfaction et leur accès de plus en plus difficile, le coût de l'énergie ne pourra aller qu'en augmentant !

Pour tenter de se faire malgré tout un « semblant d'idée », on peut se livrer à un petit calcul grossier qui consiste à estimer, au rythme actuel de leur consommation, dans combien d'années chaque **réserve d'énergie primaire fossile prouvée** sera épuisée.

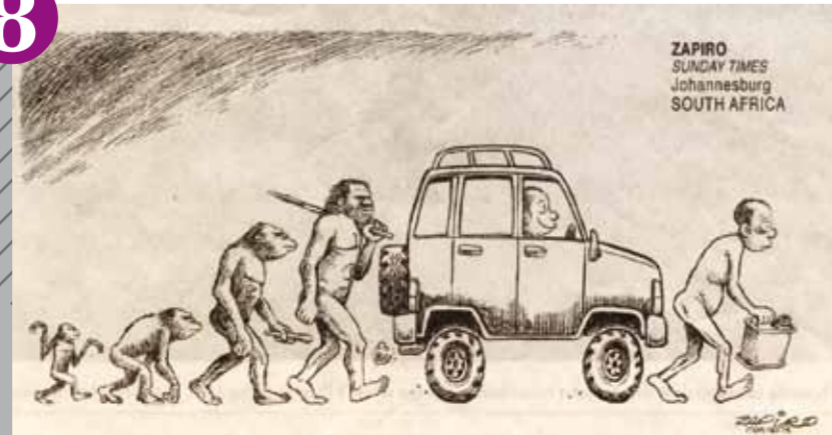
Le résultat approximatif de ce calcul est le suivant :

Ressource	réserves prouvées / consommation annuelle
Pétrole	45 ans
Gaz	65 ans
Charbon	250 ans

Si « rien ne change », bien avant la fin de ce siècle, ces quelques données chiffrées pourraient facilement se traduire par le petit dessin prémonitoire de la figure 8... « à moins que... »

8 L'évolution prévisible de l'espèce humaine au XXI^{ème} siècle...

8 L'évolution prévisible de l'espèce humaine au XXI^{ème} siècle... « à moins que » !



Les remarques émises précédemment, « si rien ne change » et « à moins que... », signifient que l'humanité devra s'engager dans l'exploitation d'autres ressources que celles actuellement identifiées comme conventionnelles et prouvées.

Ces autres ressources de pétrole et de gaz dites « **non conventionnelles** » ne sont actuellement pas comptabilisées dans les réserves conventionnelles prouvées.

Leur exploitation (gaz de schiste, sables asphaltiques, schistes et bitumineux...) est l'orientation dans laquelle certains grands pays consommateurs d'énergie tels que le Canada, les Etats Unis et bientôt la Chine, et très récemment le Japon s'engagent résolument. La même orientation sera, à n'en point douter, bientôt prise par d'autres très gros consommateurs qui explorent déjà leur sous-sol et le fond des océans. Les réserves conventionnelles mondiales d'hydrocarbures pourraient ainsi facilement être multipliées par deux, peut-être même plus si on y inclut la remise en exploitation des gisements actuellement considérés comme épuisés. Cette nouvelle orientation est évidemment de nature à détendre les tensions actuelles sur les approvisionnements en énergie et à faire baisser les prix.

Pour donner un aperçu des révolutions en cours et à venir, citons l'exemple des Etats Unis. Suite à la mise en exploitation intensive de ses réserves de gaz de schiste, entre 2008 et 2012 les cours du gaz aux USA se sont littéralement effondrés, le prix de l'unité de référence de vente du gaz (le million de BTU) est passé de 12 \$ en 2008, à 4\$ en moyenne en 2011 et à seulement 3 \$ en avril 2012. Les Etats Unis qui jusqu'alors étaient de très gros importateurs de gaz de schiste vont prochainement devenir de très gros exportateurs de gaz liquéfié, en particulier vers l'Europe... parfois réticente à les exploiter

Ainsi grâce à l'exploitation des réserves non conventionnelles, l'ombre de la pénurie s'éloignera. On ne parlerait plus que de raréfaction, la pénurie étant reportée aux siècles prochains.

Il n'est cependant pas certain que cette récente facilité d'approvisionnement, cette soudaine « bouffée d'hydrocarbures non conventionnels », soit de nature à favoriser la modération de la consommation d'énergie. Il n'est également pas certain que cette facilité constitue sur le long terme une bonne nouvelle pour la planète et pour son atmosphère qui devront inévitablement absorber une « bouffée de gaz carbonique » supplémentaire.

Introduction - Quelques notions de physique - Le Soleil - Les unités - Systèmes énergétiques

3) Energies carbonées (hydrocarbures, charbon) et environnement

3-1 LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Aux difficultés d'approvisionnement prévisibles qui apparaîtront probablement entre le milieu et la fin du XXI^{ème} siècle pour les hydrocarbures liquides, s'ajoutent les risques associés aux rejets de gaz à effet de serre.

Ces risques sont-ils réels ? Certains les amplifient à outrance (pour des raisons parfois étrangères à l'écologie) tandis que d'autres les minimisent ou les nient purement et simplement. De nouveau la polémique engendrée par la défense des intérêts particuliers ou par la confrontation des idéologies prime sur les aspects purement scientifiques. Dans la confusion que la polémique engendre, qui croire ?

Un fait est malgré tout incontestable car mesurable et quantifiable : dès aujourd'hui, au niveau mondial, l'utilisation des énergies dites carbonées, charbon et hydrocarbures, conduit à rejeter annuellement 32 milliards de tonnes de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère alors que l'ensemble du monde végétal et les océans ne peuvent en absorber que la moitié.

L'excédent, plus de 15 milliards de tonnes, ne peut que modifier les propriétés de l'atmosphère, en particulier diminuer sa « transparence » au rayonnement infrarouge que la Terre émet vers l'espace. La diminution de cette transparence est de nature à augmenter l'effet de serre atmosphérique (voir les chapitres consacrés à la « Machine climatique » et à « L'effet de serre »).

La polémique porte non pas sur l'augmentation physiquement incontestable de l'effet de serre mais sur les conséquences climatiques qu'à - ou pourrait avoir - cette augmentation de l'effet de serre.

Une saine application du principe de précaution voudrait que finalement les « climato sceptiques » et ceux qui, au contraire, sont persuadés de la nocivité de l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère, arrivent à s'entendre et persuadent les responsables des différents pays qu'il est dès à présent nécessaire voire urgent de limiter l'importance de ces rejets.

Un objectif serait de stabiliser la teneur du CO₂ dans l'atmosphère en dessous de 450 parties par millions (ppm) à la fin de ce siècle, est-il atteignable ?

3-2 LES LIMITES PRÉVISIBLES DE LA CAPTURE DES GAZ À EFFET DE SERRE

Une des solutions préconisées pour résoudre le problème posé par les émissions de gaz à effet de serre consiste à capter le gaz émis en excès par rapport à ce que la nature est capable d'absorber (l'excès actuel est de 15 milliards de tonnes chaque année) et à le stocker dans des formations géologiques profondes telles que les gisements de gaz, de pétrole ou des mines de

charbon dont on a cessé l'exploitation pour des raisons économiques.

Le stockage du gaz carbonique sera traité plus en détail au chapitre qui lui est consacré. Cependant, dès à présent, posons-nous la question fondamentale de savoir si ce stockage est réalisable à l'échelle des milliards de tonnes annuellement émises ? On peut aujourd'hui légitimement douter du réalisme de cette solution pour les raisons suivantes :

a) Les opérations de captage et de stockage ne peuvent concerner que d'importantes installations concentrées et surtout fixes (centrales de production d'électricité, cimenteries, grandes industries métallurgiques ou chimiques...). Elles restent inapplicables pour les installations diffuses ou mobiles, pour les petites installations industrielles, le chauffage domestique et l'ensemble des moyens de transport (automobile, transport routier, aérien, maritime).

b) Des expérimentations sont en cours : champ pétrolier de Weyburn au Canada où 2 millions de tonnes sont injectées annuellement, champ de Sleipner en Mer du Nord Norvégienne où 11 millions de tonnes au total ont été injectées... en 15 ans. La technologie progresse, certes, mais on est encore très loin de l'échelle des milliards de tonnes à capter et à stocker !

c) Avec une volonté réelle d'y parvenir à l'échelle de la planète, il serait sans doute possible de résoudre la plupart des difficultés d'ordre technologique liées au captage et au stockage à grande échelle du gaz carbonique. Les vraies difficultés, les entraves pourrait-on dire, sont d'un autre ordre. Elles sont d'ordre économique et politique et seront sans doute plus difficiles à résoudre :

- d'un point de vue économique, la captation et le stockage nécessitent d'importants investissements et sont de gros consommateurs d'énergie, en un mot ils sont très onéreux. Aussi, tant que le prix, appelons ce prix « taxe carbone », fixé pour rejeter le gaz carbonique dans l'atmosphère restera bas, pratiquement nul par rapport au coût d'un stockage géologique, il ne sera pas incitatif et demeurera sans effet sur une volonté réelle d'aboutir... malgré les déclarations d'intention !

- d'un point de vue politique, le principe d'une taxe sur les rejets de CO₂ dans l'atmosphère est actuellement catégoriquement rejeté par un nombre important de pays. Parmi ceux-ci figurent, évidemment est-on tenté d'écrire, les plus gros émetteurs ou ceux disposant d'importantes réserves conventionnelles ou non d'hydrocarbures, de charbon ou de lignite.

d) Par ailleurs, vis-à-vis des pays émergents, comment aujourd'hui serait-il possible aux pays de l'OCDE d'exiger d'eux ce que, par facilité et imprévoyance, nous n'avons jamais su et voulu faire par le passé ?

A ce jour, le captage et le stockage du CO₂ ne paraissent constituer ni « LA » solution unique ni « LA » solution miracle capable de résoudre le problème des émissions de gaz à effet de serre. C'est pour ces diverses raisons, qu'en 2012 les négociations au niveau mondial sur la modération de la consommation énergétique et sur les

rejets de gaz à effet de serre sont pratiquement au point mort et politiquement dans l'impasse. Chaque Etat préservant prioritairement ses intérêts en fonction de ses besoins et de ses propres ressources.

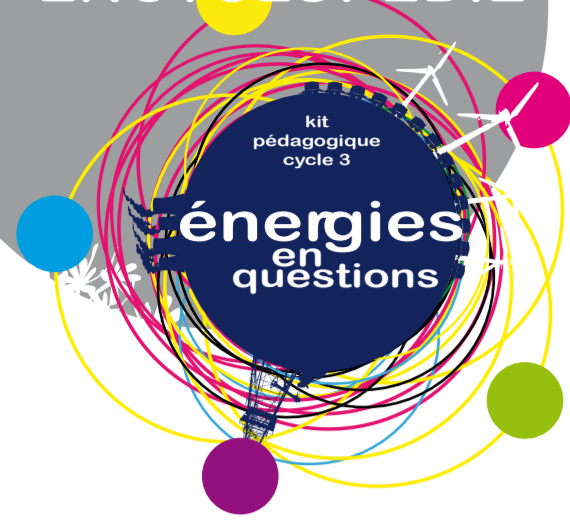
4) En guise de conclusion

Il est certain que l'humanité est à la veille de grands bouleversements dans sa manière de faire usage des diverses formes d'énergie primaires que le Soleil ou la Terre mettent à sa disposition, qu'elles soient renouvelables, fossiles, ou nucléaire.

En complément du matériel pédagogique, l'ambition de cette "petite encyclopédie" sur l'énergie est de fournir au lecteur quelques éléments essentiels, des compléments théoriques et pratiques que la Fondation Entreprise Réussite Scolaire (FERS), les enseignants et les bénévoles qui ont participé à la création de ce matériel ont estimé utiles d'apporter.

En plus des notions et des éléments strictement liées à l'énergie, il nous a semblé utile d'adjoindre un certain nombre d'encarts « **pour en savoir plus** » destinés à stimuler la curiosité en élargissant le propos à d'autres domaines, à celui des sciences de la Terre, de la physique ou encore à celui de l'économie et de la société.

Nous espérons que ce document permettra à chacun de mieux appréhender les enjeux et les bouleversements énergétiques en cours, de nourrir un esprit critique et de porter un regard et un jugement objectifs sur les divers moyens de faire face à ces évolutions.



Quelques notions de physique

1) Une proposition de définition simple : énergie = forces en action

L'acquisition des notions de physique auxquelles il doit être fait appel pour appréhender, même de manière intuitive, le concept d'énergie doit naviguer entre deux écueils, celui d'une simplification outrancière, au risque d'induire des idées fausses, ou le déversement d'une masse indigeste de connaissances, au risque de décourager le lecteur.

Paul Valéry résume fort bien la nature du dilemme : « **Tout ce qui est simple est faux, ce qui ne l'est pas est inutilisable** ».

Mis en demeure de choisir, nous avons ici opté pour le « simple ». Il constitue finalement le meilleur chemin, le seul praticable, mais, en contrepartie, nous devons prendre soin de ne pas induire de fausses représentations car, dans ce cas, mieux vaudrait ne pas savoir que de savoir mal !

Qu'on se rassure cependant, consciemment ou non, tout comme Monsieur Jourdain « faisait de la prose » sans le savoir, nous « faisons de la science » à travers le fonctionnement des objets familiers qui nous entourent ou à travers certains phénomènes que nous observons... pour peu qu'on y prête attention et cherche à en comprendre la nature profonde.

Fidèle à la démarche de la Main à la pâte nous nous référons le plus souvent possible à l'expérience quotidienne, reportant aux encarts « Pour en savoir plus » l'approfondissement de certaines notions.

Le mot « **énergie** » provient du grec **energeia** signifiant « **forces en action** ».

Ces trois mots, « forces en action », sont très certainement la formulation la plus concise, la plus pertinente et la plus simple du concept d'énergie. Si on se réfère à Paul Valéry, pour une première approche, elle n'est pas fautive et présente le mérite d'être simple et utilisable ! Nous la retiendrons donc pour nous guider et y feront abondamment référence.

« **Forces en action** », est-ce une définition satisfaisante ?

Oui, car elle associe le concept d'énergie aux notions de mouvement, de transformation et d'échange qui caractérisent le monde animé, celui de la vie ou celui des machines, par rapport au monde statique et inanimé.

Non, car la formulation est trop générale. Elle reste un tantinet abstraite et, pour être tout à fait honnête, elle ne fait que « déplacer » le problème de la définition. Remplacer le concept « **d'énergie** » par celui de « **force** » ne fait guère avancer la connaissance puisque (comme nous le verrons) le concept de force est tout aussi complexe et mystérieux que celui d'énergie ! Par hasard, ne tournerait-on pas en rond ?

Sans doute, mais il n'existe guère d'autres définitions acceptables qui puissent donner satisfaction en si peu de mots simples et compréhensibles.

En 1965, Richard Feynman, Prix Nobel de Physique, pédagogue de génie (également joueur émérite de bongo et grand amateur de canulars...) affirmait à ses étudiants « *qu'il est important de réaliser que dans la physique d'aujourd'hui nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie* ». Si même les plus grands physiciens avouent leur impuissance à fournir une définition !

Fort heureusement, si nous ne pouvons pas définir l'essence même du concept d'énergie et en donner une définition meilleure que « forces en action », nous en avons acquis une **vaste connaissance intuitive et pratique** à travers l'extrême diversité des formes sous lesquelles l'énergie se manifeste : le travail musculaire, la chaleur dégagée par la combustion du bois ou des hydrocarbures, le travail fourni par une machine, l'énergie des vents, des marées ou de la houle, le rayonnement lumineux en provenance du soleil source de la vie sur terre... etc.

Mieux encore, et bien que « l'énergie on ne sache pas ce que c'est », nous avons appris à la quantifier et à établir des lois, celles de la **mécanique** et de la **thermodynamique**, qui nous rendent compte de ses multiples métamorphoses, de la manière dont elle se transforme et se transfère d'un système à un autre, ce qui nous permet de la maîtriser et de l'utiliser. Ce qui prouve, toujours selon R. P. Feynman, « *qu'en sciences une définition rigoureuse n'est pas un préalable à l'utilisation d'un concept* » !

1 Richard P. Feynman (1918-1988)

Présentée différemment, l'énergie est un concept créé pour quantifier les interactions entre des phénomènes physiques différents, c'est une sorte de « monnaie d'échange » commune entre ces phénomènes, les échanges étant régis par des principes et des lois. Nous en évoquerons les principaux.

Très certainement, vous vous sentez frustrés de devoir vous contenter de si peu. Dites-vous que votre insatisfaction n'est pas nouvelle et qu'en physique il en est toujours ainsi dès lors que l'on prétend vouloir saisir l'essence même des concepts. Sauriez-vous par exemple donner une définition satisfaisante du « temps », de « l'espace », de la « matière » et expliquer pourquoi cette matière douée de masse « résiste » à tous les changements de mouvement qu'on tente de lui imprimer ?

Ces concepts fondamentaux ont toujours fasciné l'humanité et, malgré ses efforts et les progrès de la connaissance, ils restent des mystères insondables ! Plus on les affine plus ils se complexifient, se dérobent et s'éloignent de la notion intuitive que l'expérience quotidienne nous en fournit.

Ainsi, aux gens qui pressaient Newton (1642-1727) de questions à propos de la loi qu'il avait établie sur la gravitation, le mouvement des planètes et la chute des corps en disant « Cette loi ne nous explique rien du tout ! », il répondait, « **cette loi vous explique comment la pomme tombe. Je sais vous expliquer com-**

ment elle tombe, mais pas pourquoi elle tombe ! Et cela devrait vous suffire ! ».

2) Notion de travail, l'exemple de la bonne vieille locomotive à vapeur

Aussi étonnant que cela puisse paraître, la notion d'énergie n'est réellement apparue qu'au cours du XVIII^{ème} siècle. Elle s'est affinée au cours du siècle suivant sous l'impulsion du développement rapide de l'industrialisation, de la généralisation du machinisme et de l'emploi de la **machine à vapeur** initialement appelées « machine à feu ». C'est ainsi que le **concept d'énergie** a très tôt été associé à la **propriété d'un « système » capable de fournir un travail mécanique**, c'est-à-dire, dans la pratique, de déplacer des objets doués de masse (par exemple une locomotive tractant des wagons) ou de modifier l'état d'un objet (sa forme, sa trajectoire...). Un « système » capable de fournir un travail mécanique est toujours constitué d'une mécanique inerte, une « **machine** », associée à une « **source d'énergie** » qui lui fournit de l'énergie, une énergie sans laquelle cette machine resterait éternellement inerte.

La bonne vieille locomotive à vapeur (figure 2) fournit l'exemple type du système capable de fournir un travail.

2 Schéma simplifié d'une machine à vapeur

⊕ Pour en savoir plus La locomotive à vapeur

2-1 UN PRINCIPE FONDAMENTAL, LA TRANSFORMATION DE LA CHALEUR EN TRAVAIL

Pour qu'une machine thermique - telle une locomotive à vapeur - puisse produire un travail, elle doit **obligatoirement** échanger de l'énergie avec une **source chaude** (ici sa chaudière) qui lui fournit de l'énergie sous forme de vapeur (de chaleur) et avec une **source froide** à laquelle la machine restitue une partie de cette chaleur. Cette obligation de disposer de deux sources, l'une chaude l'autre froide, pour produire un travail à partir de chaleur, est l'un des principes fondamentaux de la **thermodynamique** qui est un chapitre de la physique qui étudie le fonctionnement des machines thermiques telles que les locomotives à vapeur.

Il est fondamental de retenir que le travail mécanique fourni par une machine est égal à la différence entre l'énergie thermique que la machine reçoit de la source chaude et l'énergie qu'elle restitue à la source froide. Dans le cas de notre locomotive la source froide est l'espace (l'atmosphère) au sein duquel la vapeur s'échappe après s'être détendue dans le cylindre en poussant les pistons.

Pour qui n'est pas habitué à manipuler ces notions d'énergie thermique, de chaleur et de travail mécanique, il apparaît choquant d'avoir ainsi à « gaspiller » une partie de l'énergie fournie par la chaudière en restituant, en pure perte, cette partie à la source froide, à l'atmosphère ! Malheureusement on ne sait pas faire autrement !

duquel la vapeur sous pression produite par la chaudière exerce une force sur le piston qu'elle déplace en le poussant. Via l'embellage, le piston entraîne les roues en rotation. Lorsque la locomotive met le train en mouvement, et uniquement lorsqu'elle le met en mouvement, on dit qu'elle fournit un travail.

C'est le « prix » qu'il convient systématiquement de payer chaque fois que l'on convertit de l'énergie sous forme thermique (la chaleur) en travail mécanique (force en mouvement). Ce point est développé en détail au chapitre Systèmes Energétiques, au paragraphe 4 consacré aux transformations et aux conversions d'énergie et au « Savoir plus » traitant du rendement théorique de Carnot.

2-2 LE TRAVAIL MÉCANIQUE, SA FORMULATION

Le travail mécanique a le sens physique d'une **force qui se déplace** ou, plus exactement, comme dans l'exemple de la locomotive, d'une **force qui déplace le point sur lequel elle s'applique**. Dans notre exemple, le point sur lequel la force s'applique est le crochet de traction qui relie la locomotive aux wagons qu'elle met en mouvement.

Mais attention, et la remarque est fondamentale, la locomotive ne fournit un travail que si la force qu'elle exerce parvient à déplacer les wagons. Une force qui ne déplace pas l'objet sur lequel elle s'applique ne fournit pas de travail ! Ce n'est apparemment pas très moral, mais la loi fondamentale de la mécanique est formelle : **une force ne fournit un travail que si elle déplace ou modifie le mouvement (ou l'état) de l'objet sur lequel elle s'applique**.

Un usage assez répandu veut qu'en physique le travail soit symbolisé par la lettre **W** en hommage à l'ingénieur mécanicien Watt qui, en 1769, déposa le premier un brevet de machine à vapeur. Exprimé sous forme mathématique, un travail mécanique « **W** » est le produit d'une force « **F** » que multiplie son déplacement « **d** ».

$$W = F \times d$$

3 Exemple de travail mécanique : le travail fourni pour soulever une charge

Dans l'exemple de la figure 3, le travail « **W** » fourni par l'homme qui monte à l'aide d'un treuil un panier rempli de matériaux de construction depuis le sol jusqu'au faite du mur est le produit de la force qu'il doit exercer sur la corde (via le treuil) par la hauteur « **h** » du mur en construction. En première approximation (aux frottements du treuil près !) la force qu'il doit exercer sur la corde est égale au poids « **P** » du panier d'où :

$$W = P \times h$$

2-3 LES UNITÉS UTILISÉES EN MÉCANIQUE

En mécanique et en thermodynamique, les trois grandeurs physiques fondamentales utilisées sont **la masse, la longueur et le temps**. Pour ces grandeurs, les unités légales sont respectivement le **kilogramme (kg)**, le **mètre (m)** et la **seconde (s)**.

Les grandeurs dérivées de ces trois grandeurs fondamentales sont **les forces** qui s'expriment en **newton (N)** et le **travail** (ou l'énergie) qui s'exprime en **joule (J)**.

La **puissance** correspond à un travail effectué (ou à une énergie produite ou dissipée) pendant l'unité de temps. Une puissance s'exprime en **watt (W)**, le watt étant un travail de un joule effectué par seconde.

Les grandeurs et les unités utilisées en méca-

nique et en thermodynamique, ainsi que les relations reliant ces grandeurs les unes aux autres, sont traitées en détail au chapitre consacré aux grandeurs fondamentales et aux unités.

La **température** n'est pas une grandeur fondamentale au même titre que les longueurs, les masses ou le temps. La température d'un gaz ou d'un solide est représentative de l'énergie cinétique (de l'énergie liée au mouvement de translation, de rotation ou de vibration) des molécules d'un gaz ou des atomes d'un solide (voir ci-après le paragraphe 5-2 consacré au mouvement brownien et à l'agitation thermique).

3) Les « forces » fondamentales de l'univers

Puisque notre idée de départ est d'associer l'énergie à une force qui se déplace, il nous faut donc développer le concept de force. C'est un sujet assez délicat que nous aborderons progressivement, essentiellement à partir d'un exemple, celui des forces de gravitation, c'est-à-dire des forces qui... font tomber les pommes et qui sont à l'origine de notre poids à la surface de la Terre. Un exemple on ne peut plus Terre à Terre !

3-1 LES TROIS TYPES DE FORCES

Dans l'Univers il existe trois types de forces : les **forces électromagnétiques**, les **forces gravitationnelles** et les **forces nucléaires**. Ces trois forces sont à l'origine de toutes les formes d'énergie connues. Comme nous l'avons déjà mentionné, elles sont de nature mystérieuse d'autant qu'elles agissent à distance... ce qui ne fait qu'épaissir le mystère qui les entoure et compliquer leur compréhension. Ces forces, qu'elles soient d'attraction ou de répulsion, agissent à distance dans une « zone d'influence » plus ou moins vaste qu'on appelle en physique un « **champ** ». Il existe donc des champs électriques, des champs magnétiques, des champs électromagnétiques, des champs gravitationnels et des champs de forces nucléaires.

Certaines, telles les forces gravitationnelles et électromagnétiques, ont une zone d'influence très vaste, elles ont théoriquement une portée infinie. Par exemple, les forces gravitationnelles agissent à l'échelle des galaxies, entre galaxies et amas de galaxies, à une échelle pour laquelle les distances s'expriment en millions voire en milliards d'années-lumière.

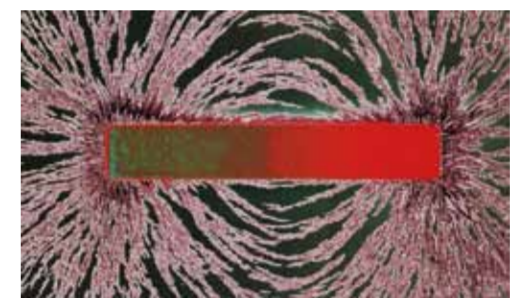
A contrario d'autres forces, telles que les forces nucléaires, ont une portée extrêmement limitée, de l'ordre de grandeur du noyau atomique, soit le milliardième de milliardième de mètre (10⁻¹⁵ m). Si leur portée est faible, leur intensité est par contre très élevée ; ce sont elles qui assurent la stabilité du noyau des atomes et qui parviennent à vaincre les forces de répulsion électrique existant entre les particules constituant le noyau des atomes.

Notons qu'une force ne peut « s'exprimer », c'est-à-dire être active et être perçue au travers de ses effets, que si elle peut agir sur une matière lui permettant de s'exprimer. Ainsi, les forces de gravitation agissent sur tout corps doué de masse, les forces magnétiques sur certains matériaux contenant du fer, du nickel, du cobalt, mais pas sur ceux uniquement constitués d'aluminium ou de cuivre, les forces nucléaires agissent sur les particules élémentaires constituant le noyau des atomes...etc.

3-2 EXEMPLE DE CHAMP DE FORCES AGISSANT À DISTANCE

a) Premier exemple : les champs de forces magnétiques

Bien que mystérieuse, la notion de champ de forces magnétiques agissant à distance nous est familière. Par exemple, elle s'exprime et nous la percevons à travers l'action des aimants sur une boussole, la fermeture magnétique de la porte des réfrigérateurs ou des pense-bêtes magnétiques que l'on y colle, les moteurs électriques... etc. La notion de champ magnétique a été proposée au XIX^{ème} siècle par Faraday (1791-1867) pour expliquer l'action à distance d'un aimant. Une approche expérimentale du champ magnétique nous est donnée par l'agencement de la limaille de fer posée sur une feuille de papier sous laquelle est placé un aimant (figure 4). La limaille visualise les lignes de force du champ magnétique créé par l'aimant en se disposant selon ces lignes de force.



4 Un champ magnétique simple, celui d'un barreau aimanté attirant de la limaille de fer

Il existe des champs magnétiques beaucoup plus complexes que celui d'un simple barreau aimanté. L'un de ces champs, la « magnétosphère », est le champ magnétique entourant la Terre, les boussoles sur lesquelles il agit en indiquent la direction : Nord-Sud.

5 Le champ magnétique terrestre déviant le vent solaire

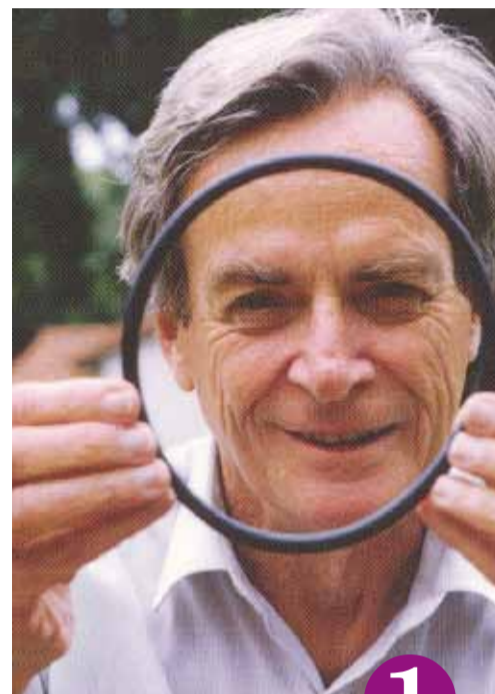
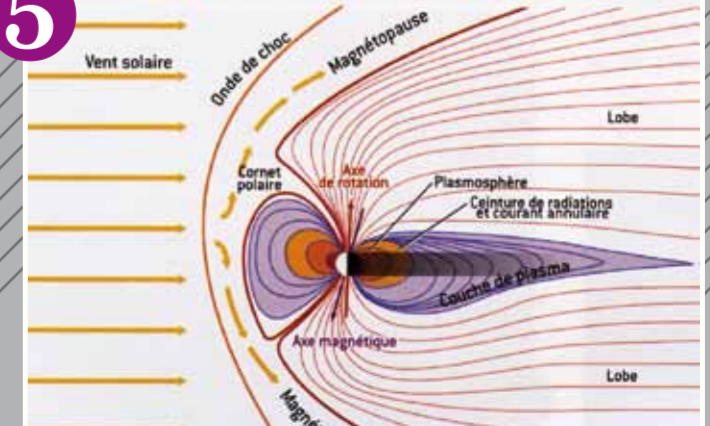
Il agit également en déviant les particules électriquement chargées en provenance du soleil, le « vent solaire », ce qui a pour effet de nous en protéger. Sans cette protection, il est probable que la vie sur notre planète, sous la forme que nous lui connaissons, serait impossible. Parmi les autres manifestations spectaculaires du champ magnétique terrestre : les aurores boréales. Aux latitudes élevées, près des pôles, une partie des particules chargées électriquement en provenance du Soleil sont piégées dans la haute atmosphère par le champ magnétique terrestre (les cornets polaires figure 5) et entrent en collision avec les molécules d'oxygène et d'azote de l'atmosphère qu'elles excitent. En se déséxcitant ces molécules donnent naissance à un rayonnement lumineux vert et rouge à l'origine du merveilleux spectacle que sont les voiles des aurores boréales.

6 Aurores boréales.

La lumière émise provient de l'interaction entre des particules électriquement chargées en provenance du Soleil piégées par le champ magnétique terrestre et les molécules des gaz de la haute atmosphère.

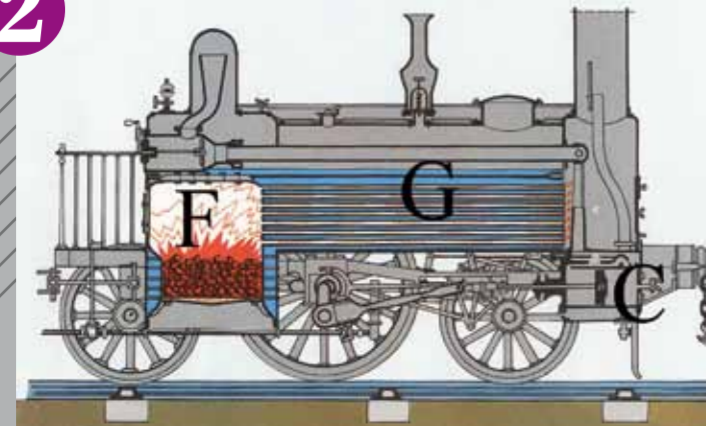
⊕ La magnétosphère

5 Le champ magnétique terrestre déviant le vent solaire



1 Richard P. Feynman (1918-1988) Couverture d'un de ses livres intitulé « Vous y comprenez quelque chose, Monsieur Feynman ? »

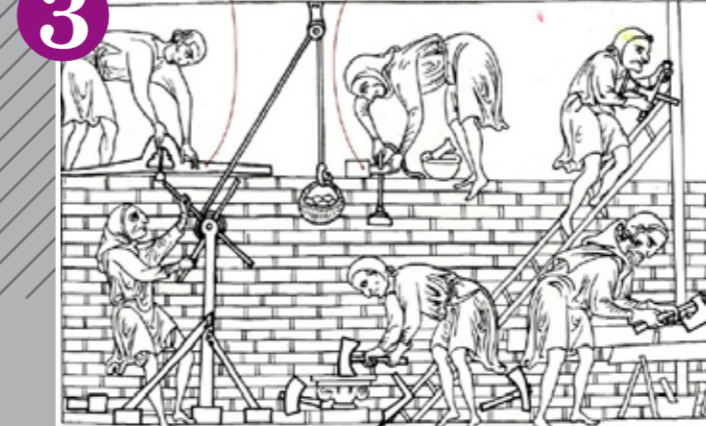
2 Schéma simplifié d'une machine à vapeur

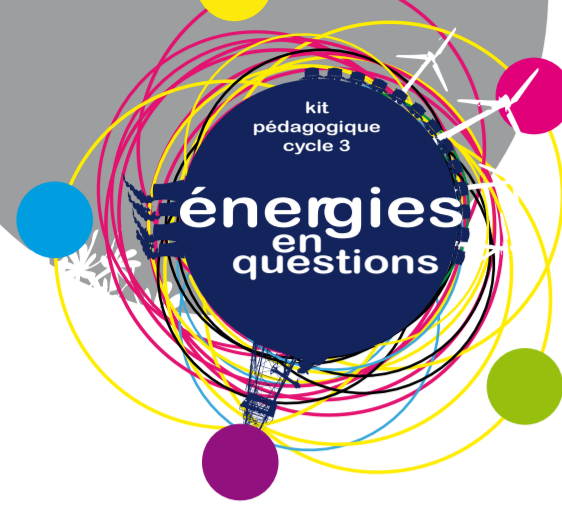


⊕ La locomotive à vapeur

La source d'énergie de la locomotive est sa chaudière. Cette chaudière est constituée du foyer (F) où l'on brûle du charbon et d'un faisceau de tubulures (G) à l'intérieur desquelles la chaleur dégagée par la combustion du charbon vaporise de l'eau et produit de la vapeur sous pression. La « machine » est la partie mécanique, inerte par elle-même, de la locomotive. Elle est constituée du cylindre (C) à l'intérieur

3 Exemple de travail mécanique : le travail fourni pour soulever une charge





3-3 UN EXEMPLE DE FORCE : LES FORCES GRAVITATIONNELLES

Comme annoncé précédemment, nous développerons plus spécifiquement les forces gravitationnelles car elles nous sont physiquement et immédiatement perceptibles, ne serait-ce qu'à travers la force gravitationnelle qui nous attire vers le centre de la Terre, notre propre « poids », et parce qu'elles nous permettront d'aborder « assez aisément... », et surtout concrètement, les différentes notions de force, de vitesse et d'accélération qui sont nécessaires à la compréhension du concept d'énergie.

3-3-1 Un peu d'histoire : Galilée, Newton... et les autres

Et pour commencer, un rappel historique. Ce rappel nous montrera que ces notions mécaniques de force, de trajectoire, de vitesse et finalement d'énergie ne sont pas du tout innées et, qu'au cours de la longue histoire de l'humanité et des sciences, ces notions n'ont émergé que très progressivement et parfois même dans le tumulte et la fureur des controverses. Qu'on se réfère aux démêlés de Galilée (physicien et astronome Italien 1564-1642) avec le tribunal de l'Inquisition qui le contraignit à abjurer sa théorie, issue des idées de Copernic, selon laquelle la Terre tourne autour du Soleil et sur elle-même ! Ce qui ne l'empêcha pas de murmurer, sans doute à voix basse mais cependant de manière audible, « Et pourtant, elle se meut ! » Depuis les grecs en passant par les Perses et les astronomes Arabes, il aura fallu plus de 20 siècles, l'intuition et le génie des plus grands esprits, astronomes, mathématiciens, physiciens et philosophes, pour comprendre et établir les lois qui, dans l'Univers rendent compte du mouvement des objets et la forme de leur trajectoire. Ce n'est qu'à la fin du XVIIème siècle que Newton (mathématicien, physicien, astronome et penseur anglais, 1642-1727) explicitera l'existence des forces gravitationnelles et traduira sous une forme mathématique les lois selon lesquelles ces forces régissent le mouvement des planètes et des objets. Soulignons une nouvelle fois que ces lois décrivent « comment » ces forces agissent et non pas « pourquoi » elles agissent. On ne connaît toujours pas leur nature profonde !

7 La légende voudrait que Newton ait découvert les lois de la gravitation en regardant tomber les pommes

L'aventure scientifique qui aboutit à l'énoncé final des lois de la gravitation débute réellement avec Copernic (astronome Polonais, 1473-1543) et l'élaboration d'une nouvelle théorie sur le mouvement des planètes selon laquelle elles tournent sur elles-mêmes et gravitent autour du Soleil. Se basant sur cette nouvelle théorie et les observations faites par Tycho Brahé (astronome Danois, 1546-1601), Kepler (astronome Allemand, 1571-1630) en déduit les lois qui portent son nom. Les trois lois de Kepler décrivent le mouvement de chaque planète autour du Soleil, les caractéristiques de leur orbite elliptique et le lien existant entre ces caractéristiques géométriques et leur période de révolution. Restait à expliquer par quel miracle les planètes gravitent autour du Soleil sur une orbite ellip-

tique fermée sans s'en éloigner ou, au contraire, sans venir s'y écraser ! La réponse fut apportée progressivement, en deux temps, tout d'abord par Galilée puis par Newton. En premier lieu Galilée édicta le principe fondamental de l'inertie, l'inertie étant la propriété de la matière douée de masse à s'opposer à tout changement de son mouvement. Le principe d'inertie de Galilée peut s'énoncer de la manière suivante : « si rien n'agit sur un objet se déplaçant à une certaine vitesse en ligne droite, l'objet continuera indéfiniment à se déplacer à la même vitesse et sur la même ligne droite ».

Je pressens d'ici votre réaction ! Fallait-il attendre le dix-septième siècle pour énoncer un principe qui semble tellement évident : si on ne fait rien, si on ne touche à rien, bref si rien ne se passe, tout continue comme avant ! Faudrait-il se pâmer devant ce qui semble n'être qu'une lapalissade ? Eh bien oui. Sachez, primo, que ce principe n'est pas une lapalissade et, secundo, qu'il constitue le fondement même du plus vaste domaine de la physique classique, celui de la mécanique newtonienne s'appliquant au mouvement de tous les objets de l'Univers. Plus tard, et énoncé sous une forme différente, il permit à Newton de formuler les lois de la gravitation et, selon la légende... celles de la chute des pommes !

Cependant, de manière paradoxale, ce principe d'inertie universel, cette lapalissade qui vous semble si évidente et tellement triviale... ne rend tout simplement pas compte de la réalité ! En effet, dans l'Univers rien ne va droit (aucune allusion ici aux affaires du Monde !) tout tourne autour de « quelque chose » ou finit par tomber sur « quelque chose » : pas de trajectoire éternellement rectiligne et pas de vitesse restant constante soit en grandeur soit en direction. La Terre tourne autour du Soleil et les pommes tombent des pommiers, non pas à une vitesse constante, mais selon un mouvement de chute uniformément accéléré. Dans la réalité rien ne va vraiment en ligne droite, pas même la lumière ! Sans jeu de mots, cela mérite d'être éclairci.

Avant Kepler et Galilée certains avaient bien tenté d'expliquer pourquoi les planètes tournaient autour du Soleil, (ce qu'ils avaient à contrecœur fini par admettre), parce que, disaient-ils, derrière chaque planète des anges battaient des ailes pour les empêcher d'aller tout droit ! Cette explication fut bien évidemment abandonnée mais pas l'idée qu'une « force » devait très certainement agir sur les planètes pour les dévier de la trajectoire rectiligne et les obliger à suivre une orbite fermée autour du Soleil. A défaut d'anges, quelle était donc la nature de cette force et comment agissait-elle ?

C'est à Newton que revient le mérite d'avoir fourni une partie de la réponse à cette double interrogation. Afin de tenir compte des observations des astronomes, dans un premier temps il reformule différemment le principe d'inertie de Galilée selon lequel, en l'absence de toute action sur un objet, la vitesse de l'objet reste constante et sa trajectoire reste indéfiniment une droite. Puisque les trajectoires des planètes ne sont pas des droites et que leur vitesse varie en intensité et en direction, et qu'il est exclu de remettre en cause le principe d'inertie, Newton postule logiquement qu'une force agit sur ces planètes. Il ne peut pas y avoir d'autre explication ! Ainsi reformulé par Newton, le principe d'inertie s'énonce désormais ainsi : « il faut qu'une force agisse pour modifier la vitesse d'un objet

de quelle façon que ce soit, que ce soit en grandeur ou en direction ».

3-3-2 La loi de la gravitation universelle.

A partir des lois précédemment formulées par Kepler, Newton montre : - que la force gravitationnelle qui astreint les planètes à tourner autour du Soleil est une force dirigée en permanence vers le Soleil, c'est-à-dire une force centripète semblable à la traction qu'une ficelle que l'on tient dans la main exerce sur un objet que l'on fait tourner autour de soi comme une fronde,

8 La trajectoire d'une planète autour du Soleil

- que l'intensité de cette force varie en fonction de la distance séparant chaque planète du Soleil, qu'elle varie comme l'inverse du carré de la distance séparant chacune des planètes du Soleil. Finalement, et plus généralement étendue à tous les objets de l'Univers et non plus aux seules planètes, la loi de la gravitation stipule que deux corps de masses « M » et « m » exercent l'un sur l'autre une force d'attraction qui varie proportionnellement à deux termes : - le premier terme, est l'inverse du carré de la distance « d » qui les sépare : (1/d²) - le second terme, est le produit de leurs masses (M x m).

Mathématiquement la force F gravitationnelle d'attraction qui s'exerce entre deux corps de masses M et m s'exprime par la formule :

$$F = G (M m) / d^2$$

Formule dans laquelle « G » est une constante universelle, tout comme sont des constantes universelles la vitesse « C » de propagation de la lumière dans le vide ou la constante « h » de Planck.

Il est étonnant qu'une formule aussi si simple puisse permettre de calculer et de prédire le mouvement de tous les objets, planètes, étoiles et galaxies de l'Univers, de calculer des années à l'avance avec une extrême précision la date d'une éclipse, l'horaire des marées... ou, plus prosaïquement, notre poids sur Terre, sur la Lune ou sur Mars.

Tout aussi étonnantes sont les non moins célèbres et simplissimes lois d'Einstein reliant la masse et l'énergie (E = mc²) ou celle de Planck reliant l'énergie E d'un photon à sa fréquence ν (E = hν) !

En dehors de toute considération scientifique soulignons que l'élaboration des lois sur la gravitation universelle a mobilisé pendant plus de deux siècles les plus grands scientifiques de l'époque : Copernic (Pologne), Galilée (Italie), Tycho Brahé (Danemark), Kepler (Allemagne), Newton (Angleterre), Descartes (France)... Une coopération européenne exemplaire, l'Union avant l'heure. On s'y déplaçait à cheval et on s'échangeait les idées et les découvertes en latin ! - En l'absence de toute force gravitationnelle s'exerçant sur une planète, sa trajectoire serait rectiligne et sa vitesse resterait constante tant en grandeur qu'en direction, - Sous l'effet d'une force gravitationnelle dirigée vers le Soleil, le mouvement réel de la planète est dévié et s'effectue selon une orbite elliptique fermée dont un des foyers est le Soleil.

3-4 RELATIONS ENTRE MASSE, VITESSE, ACCÉLÉRATION, FORCE ET ÉNERGIE

3-4-1 La masse et le poids d'un objet

La matière est douée de masse et tout objet est caractérisé par sa masse « m ». Cette masse est une constante : que ce soit sur la Terre, sur la Lune, dans le vide ou partout ailleurs dans l'Univers, un objet aura toujours la même masse. Quel que soit son environnement cette masse ne varie pas, elle reste constante.

Comment se fait-il alors que, si la masse « m » d'un cosmonaute est rigoureusement la même sur Terre que sur la Lune, le pauvre cosmonaute peine sur Terre à se déplacer avec son scaphandre alors que sur la Lune il se déplace comme un cabri, très aisément, par bonds tel un kangourou ? L'explication de cette différence réside dans la formule de la gravitation :

$$F = G (M m) / d^2$$

La force F d'attraction qui attire le cosmonaute vers le sol, son poids, est beaucoup plus importante sur Terre que sur la Lune par le fait que, dans cette formule, la masse « M » de la Terre est 100 fois plus importante que la masse « M » de la Lune. Imaginons que notre cosmonaute puisse se poser sur le sol de l'astre du jour, sa masse étant 324 500 fois plus importante que celle de la Terre !



9 Le Petit Prince et son astéroïde B 612

Compte tenu de la masse minuscule de son astéroïde B 612, le Petit Prince n'éprouve aucune peine à s'en échapper pour aller rejoindre Saint Exupéry tombé en panne au milieu des sables du Sahara, sur son astéroïde son poids est quasi nul. Par contre, sur Terre, dont la masse est énorme comparée à celle de son astéroïde, il éprouvera beaucoup de difficultés pour s'en arracher et retourner sur B 612 !



Revenons sur Terre pour établir la relation existant entre la masse et le poids d'un objet. En analysant chaque terme de la formule de la gravitation, F = G (M m)/d², on constate que - « G » est une constante universelle, la même dans tout l'Univers, - la masse de la Terre « M » et la distance « d » de chaque objet à son centre sont également les mêmes pour tous les objets placés à sa surface. On en conclut que la grandeur G(M)/d² appelée « accélération de la pesanteur » est une constante, la même pour tous les objets situés à la surface de la Terre. Cette grandeur constante, symbolisée par la lettre « g » s'exprime (en termes barbares...) en « mètre par seconde, par seconde » ou « mètre par seconde au carré ».

A la surface de la Terre la valeur moyenne de « g » est 9,81 m/s/s. En résumé, sur Terre, le poids « P » d'un objet s'exprime par rapport à sa masse « m » par la relation toute simple :

$$P = 9,81 m$$

Mais attention aux unités !!! Dans cette relation la masse s'exprime en kilogrammes et le poids (qui est une force) s'exprime en newtons.

Précisons immédiatement par un exemple : le poids d'une personne dont la masse est de 82 kilogrammes, « pèsera » 82 x 9,81 soit 804,42 newtons... C'est ainsi que l'on s'exprime (correctement !) en physique. Par contre, dans la vie courante, si vous achetez un kilo de pommes de terre, ne demandez surtout pas au marchand de légumes de vous donner « 9,81 newtons de patates », il risquerait de vous regarder d'un drôle d'air !



Ne modifiez surtout pas vos habitudes, demandez-lui un kilo de pommes de terre. Vous achetez une masse de un kilogramme de pommes de terre et non pas l'attraction (9,81 newtons) que la Terre exerce sur cette masse de un kilogramme

de pommes de terre ! Par contre le marchand utilisera une balance qui mesurera (sans qu'il le sache) la force de l'attraction (9,81 newtons) que la Terre exerce sur vos pommes de terre, c'est à dire leur poids.

3-3-2 Relation entre masse, vitesse, accélération et force

La vitesse exprime la distance que parcourt un mobile pendant l'unité de temps. Dans le système légal elle s'exprime en mètre par seconde (m/s ou, en notation avec exposant, ms⁻¹). Dans la vie courante on parle plus fréquemment de vitesse en kilomètre par heure et de centimètre par heure pour les escargots !

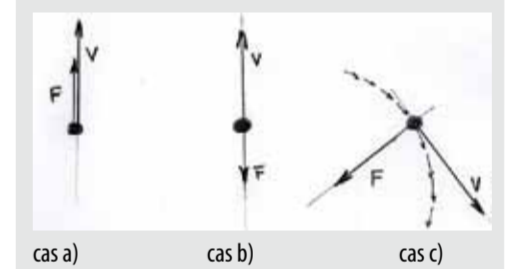
L'accélération correspond à la variation d'une vitesse (exprimée en mètre par seconde) pendant l'unité de temps. L'unité d'accélération s'exprime donc en mètre par seconde par seconde (m/s/s ou ms⁻²).

Le principe d'inertie de Galilée, tel que reformulé par Newton, stipule : « Qu'il faut qu'une force agisse pour modifier la vitesse d'un objet de quelle façon que ce soit, que ce soit en grandeur ou en direction ». L'expérience montre qu'il en est bien ainsi.

Pour un objet de masse « m » sur lequel s'applique une force « F », la relation existant entre la masse m, la force F et la variation de la vitesse de l'objet, son accélération « a », est :

$$F = m a$$

Les trois cas, a) b) et c) de la figure 10 illustrent diverses configurations selon que la force s'exerce sur un objet à la même direction ou une direction différente de celle de la vitesse de l'objet.



10 Illustration du principe d'inertie dans diverses configurations de vitesse (V) et de force (F) appliquées à un objet.

Cas a). Dans ce premier cas, la force (F) appliquée sur un objet à la même direction que sa vitesse (V) : la vitesse de l'objet augmente sans que la direction de sa trajectoire change, la trajectoire est et reste rectiligne. C'est le cas du décollage d'une fusée (fig 11). La poussée du moteur à la même direction que la vitesse déjà acquise, la poussée engendre une accélération positive de la fusée, sa vitesse croît tant que le moteur exerce une poussée.

11 (F) et (V) même direction, même sens : accélération

11 (F) et (V) même direction, même sens : accélération



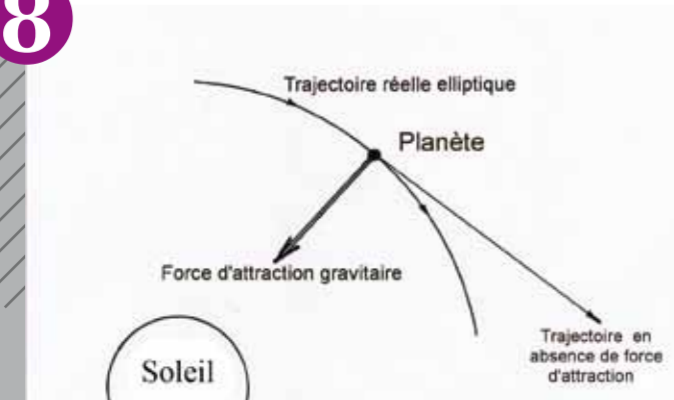
12 (F) et (V) même direction mais sens opposé : décélération, freinage

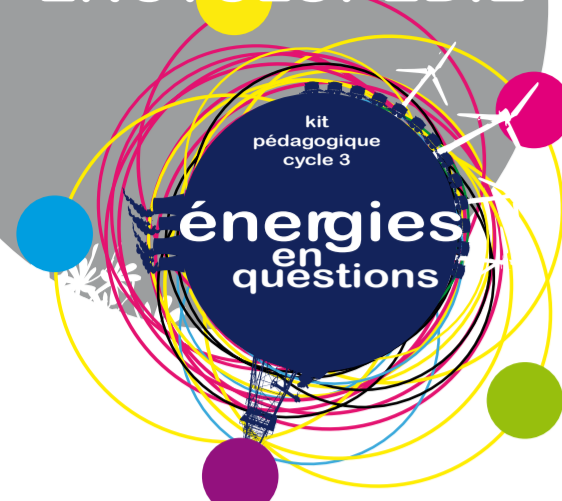


13 (F) et (V) perpendiculaire : rotation



8 La trajectoire d'une planète autour du Soleil





Hors de la maison, les applications sont tout aussi innombrables, dans l'industrie et les transports, tout ce qui est mû par un moteur électrique

Dans le cas des réactions chimiques, le siège des réactions se situe au niveau du cortège électronique des atomes (et non à celui du noyau des atomes), de la liaison entre atomes.

Les réactions de nature chimique les plus importantes d'un point de vue énergétique sont la photosynthèse qui est création de biomasse végétale à partir du CO₂ de l'atmosphère, de l'eau et de l'énergie (les photons) fournie par la lumière en provenance du Soleil et les réactions de combustion (d'oxydation) de cette biomasse qu'elle soit de formation récente ou qu'elle soit fossilisée (pétrole, gaz, charbon).

3-6 LES FORCES NUCLÉAIRES

Le troisième type de forces, les forces nucléaires, s'exercent entre les diverses particules, les protons et les neutrons qui constituent le noyau des atomes.

La notion de forces nucléaires est beaucoup plus complexe à appréhender que celle des deux forces précédentes dont nous pouvons quotidiennement et concrètement côtoyer les effets ou les applications. Les forces nucléaires nous sont étrangères, elles font partie du monde de l'infiniment petit totalement inaccessible à nos sens, sinon à notre entendement, d'où leur nature encore plus mystérieuse... et pour certains, inquiétante.

Cependant, comme les deux types de forces précédents, elles sont partout à l'œuvre au sein de l'univers : elles sont à l'origine même de toutes les formes d'énergie que nous connaissons et utilisons puisque, comme nous le verrons, toute énergie émane directement ou indirectement de réactions nucléaires dont le siège est le noyau des atomes.

On distingue les réactions nucléaires de « fusion » et celles de « fission ». Les premières se produisent au sein des étoiles, au sein de notre Soleil qui, in-fine, nous fait parvenir l'énergie qu'il produit sous forme de rayonnement électromagnétique, de lumière visible, et de rayonnement ultraviolet ou infrarouge (voir le chapitre consacré au Soleil).

Les secondes, les réactions nucléaires de fission, se déroulent au sein des réacteurs centrales ou... « naturellement » dans des réacteurs fossilisés ayant fonctionné il y a un milliard d'années à Oklo au Gabon, découverts récemment (voir le chapitre consacré à l'énergie nucléaire de fission, dont le « savoir plus » sur les gisements d'Oklo).

⊕ Pour en savoir plus
Le fonctionnement des étoiles

Les forces nucléaires ne sont pas uniquement à l'œuvre au sein des étoiles ou des réacteurs nucléaires électrogènes, elles sont également à l'origine des phénomènes liés à la radioactivité. Elles sont par exemple à l'origine de la désintégration des éléments naturellement radioactifs, l'uranium et ses descendants (radium, radon...), que l'on trouve dans les roches volcaniques (les basaltes...) ou plutoniques (les granites, les gabbros...), dans les roches qui remontent du manteau pour constituer la croûte terrestre sur laquelle nous vivons.

Au cœur des étoiles, à des températures de plusieurs millions de degrés (15 millions pour le Soleil et 100 millions pour les étoiles les plus massives !), la réaction de fusion nucléaire des noyaux d'hydrogène initiaux génère par cycles successifs les divers éléments de la matière qui nous entoure et dont nous sommes nous-mêmes constitués.

14 Structure schématique en « pelure d'oignon » du centre d'une étoile géante

Orange : enveloppe externe d'hydrogène, le carburant à l'origine des premières réactions de fusion, Jaune : zone de fusion où l'hydrogène génère l'hélium Violet : zone de température plus élevée, la fusion de l'hélium produit du carbone et de l'oxygène Bleu clair : zone de température encore plus élevée fusion du carbone et de l'oxygène formant du néon, puis dans les étoiles les plus massives, de proche en proche, du silicium et du fer

Très schématiquement (Figure 14), au cœur des étoiles, au cours d'un premier cycle, à partir de l'hydrogène qui constitue l'essentiel des matériaux constituant une étoile jeune, les réactions de fusion donnent naissance à de l'hélium. Au cours d'un cycle ultérieur accompli à des températures plus élevées, l'hélium donne lui-même naissance à du carbone et de l'oxygène. Lors d'un nouveau cycle de fusions accompli à des températures toujours plus élevées, des éléments de plus en plus lourds se forment, le néon...etc. C'est ainsi, par cycles successifs et à des températures de plus en plus élevées, que sont générés à partir de l'hydrogène primordial les divers corps simples qui constituent l'Univers.

C'est ainsi, au cœur des étoiles les plus massives et les plus chaudes, que les réactions de fusion génèrent par nucléosynthèse les éléments jusqu'au silicium et au fer. Lorsque au cœur d'une étoile massive la matière alimentant les réactions de fusion s'épuise, l'énergie dégagée par la fusion diminue et l'équilibre entre les forces d'expansion de l'étoile

⊕ Le fonctionnement des étoiles

La désintégration radioactive de ces éléments naturels est à l'origine de la majeure partie (environ les 2/3) de la chaleur qui parvient des profondeurs de la Terre et dont la dissipation engendre les gigantesques mouvements de convection des matériaux situés à l'intérieur du globe terrestre (voir le chapitre consacré à l'énergie géothermique).

Ces mouvements se répercutent jusqu'à la croûte externe de la Terre et, à l'échelle de centaines de millions d'années, en modèlent la topographie, déplaçant les continents, ouvrant ou fermant les océans, érigeant des chaînes de montagnes, créant dans la croûte terrestre rigide d'énormes contraintes qui s'accumulent avant de se libérer subitement avec une brutalité extrême lors des séismes. L'ensemble de ces déplacements est connu sous le nom de tectonique des plaques, autrefois appelée dérive des continents.

(d'autant plus importantes que la température au cœur de l'étoile est élevée) et les forces gravitationnelles se rompt. Dans un premier temps, les forces de gravitation l'emportent sur les forces d'expansion et l'étoile s'effondre brutalement sur elle-même. La fabuleuse énergie (l'énergie potentielle) dégagée par cet effondrement provoque en réaction un rebond et finalement l'explosion de l'étoile. Une explosion d'une violence inouïe qui donne naissance à une supernova.

15 Explosion d'une étoile géante (supernova) NGC6751 dans la Constellation Aquila

Les matériaux que l'étoile a générés par nucléosynthèse au cours de sa vie sont alors projetés à travers l'espace à des vitesses vertigineuses ; dans l'illustration de la figure 15, les vitesses d'expansion sont supérieures à 2 500 km/seconde (non pas 2 500 km par heure mais bien par seconde !).

Plus tard dans l'espace, sous l'effet des forces de gravitation, les matériaux projetés par la supernova peuvent se rassembler sous forme d'immenses nuages de gaz et de poussières. Par accumulation de matériaux, et dans certaines circonstances, ces nuages peuvent constituer des pouponnières où, toujours sous l'effet de forces gravitationnelles, de nouvelles étoiles dites de seconde génération se forment par accrétion, par agglomération de ces gaz et poussières.

Le Soleil est une étoile de seconde génération, comme l'atteste la présence d'éléments tels que le fer dans la composition de son atmosphère externe.

Lors de l'explosion cataclysmique d'une supernova, sa brillance peut atteindre 10 milliards de fois celle du Soleil et briller dans le ciel avec la même luminosité qu'une galaxie. La supernova que les chinois virent brutalement apparaître dans le ciel le 4 juillet 1054 resta visible en plein jour pendant près d'un mois !

La genèse des corps simples au-delà du fer et jusqu'à l'uranium (l'élément le plus lourd existant naturellement dans l'Univers) s'effectue lors de l'explosion de la supernova selon des processus autres que celui de la nucléosynthèse par fusion décrit précédemment.

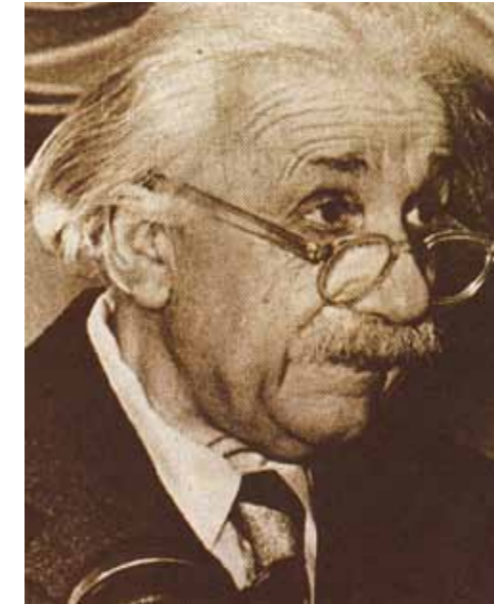
La chaleur générée à l'intérieur de la Terre par des forces nucléaires libérées lors de la désintégration des éléments naturels radioactifs est également à l'origine de toutes les manifestations volcaniques et géothermiques, terrestres ou sous-marines (sources chaudes, geysers, fumeurs noirs des grands fonds...).

Il est étonnant de voir que des forces qui ne s'exercent qu'à l'échelle du noyau des atomes puissent avoir des effets qui se répercutent à l'échelle planétaire.

4) L'équivalence entre la matière et l'énergie

Pour le grand public, la formule la plus célèbre de la physique (elle a même donné son nom à un groupe de musique Rock !) est sans conteste celle formulée par Albert Einstein en 1905.

E = mc²



16 Albert Einstein

Que signifie-t-elle ? Elle établit une équivalence entre l'énergie « E » et la matière caractérisée pas sa masse « m ». Elle établit que de la matière peut se transformer en énergie et que, réciproquement, de l'énergie peut se transformer en matière. Une très étrange chose que cette transformation de matière, physiquement et matériellement palpable, en énergie qui est à nos yeux un concept totalement dématérialisé. Aussi étrange est la transformation inverse, d'énergie immatérielle en matière !

Il s'agit pourtant d'une réalité. Reprenons les réactions nucléaires de fusion qui se déroulent au sein du Soleil pour l'illustrer.

Chaque seconde, les réactions nucléaires au sein du Soleil consomment environ deux millions de tonnes d'hydrogène pour former par fusion de l'hélium. Une partie de la masse initiale de l'hydrogène « disparaît » et se transforme en énergie qui, après moult péripéties, parvient finalement à émerger sous forme de lumière à la surface du Soleil. Huit minutes plus tard nous recevons sur Terre une infime partie de cette énergie, cette « infime partie » constituant la source essentielle de l'énergie nécessaire à la vie sur notre planète !

Très schématiquement, au sein du Soleil, la fusion de quatre noyaux d'hydrogène génère un noyau d'hélium. Si on pouvait mesurer la masse de chaque élément avant et après la réaction de fusion, on constaterait que la masse du noyau d'hélium généré est inférieure à la somme des masses des quatre noyaux d'hydrogène initiaux. L'écart, la différence entre les masses initiales et finales, correspond à une perte de masse que nous appelons « Δm ».

L'énergie « E » dégagée par la réaction de fusion des quatre noyaux d'hydrogène pour générer le noyau d'hélium est liée à Δm par la relation établie par Einstein :

E = Δmc²

Dans cette relation, « C » est la vitesse de la lumière dans le vide (300 000 000 ou 3 10⁸ mètres par seconde), la perte de masse Δm est exprimée en kilogrammes et l'énergie E en joules. On remarque immédiatement que le terme C², le carré de la vitesse de la lumière, est un nombre gigantesque : 9 10¹⁶ soit un 9 suivi de 16 zéros ! Ce qui montre que dans toute réaction nucléaire, qu'elle soit de fusion ou de fission, à

toute perte de masse, même faible, correspond un dégagement d'énergie considérable.

L'autre type de réactions nucléaires est la fission. Au sein d'un réacteur nucléaire ce type de réactions consiste à « casser », à fissionner, des noyaux atomiques d'uranium ou de plutonium dits fissiles. Tout comme lors d'une réaction de fusion, la fission d'un noyau fissile s'accompagne d'une perte de masse, la somme des masses des produits résultant de la fission (des produits dits de fission et des neutrons émis) est inférieure à la masse du noyau fissile initial. Cette perte de masse correspond à une production d'énergie que l'on récupère sous forme de chaleur destinée à la production d'électricité.

Un chapitre spécifique est consacré à l'énergie nucléaire de fission.

5) Un peu de théorie... assez accessible

On distingue deux grands types d'énergie :

E = mg h

a) l'énergie liée à un mouvement ou à une agitation. Cette forme d'énergie est dite énergie cinétique, du grec kinéma signifiant « mouvement ».

L'énergie cinétique (symbole Ec) caractérise l'énergie que possède un objet (ou une particule) de masse « m » animé d'une vitesse « V ». L'énergie cinétique de cet objet est proportionnelle au carré de sa vitesse V et s'exprime par la formule :

Ec = 1 / 2 m V²



17 Exemple d'utilisation de l'énergie cinétique

Le forgeron du marché Deir ez Zör (Syrie), le frappeur, communique à la masse de son marteau une vitesse, et donc une énergie cinétique, telle qu'en venant s'abattre sur la cisaille la barre d'acier est sectionnée. Le mouvement du bras du forgeron est si rapide et si violent qu'en une fraction de seconde, le temps de la prise de vue, on ne peut percevoir que la trace du déplacement de son bras. Au moment où la masse du marteau frappe la cisaille, l'énergie cinétique communiquée par

le forgeron à la masse se transforme en énergie mécanique et, si celle-ci est suffisante, elle cisaille la barre de fer.

b) Le second type d'énergie est l'énergie potentielle ou, exprimé de manière imagée, « l'énergie dormante ». L'énergie potentielle est une énergie qui ne devient active que lorsqu'elle est « libérée ». Pour illustrer cette notion d'énergie potentielle, et pour faire court, assimilons-la à l'énergie dormante de l'eau d'un lac de retenue accumulée derrière un barrage. Rien ne se produit jusqu'au moment où les vannes du barrage s'ouvrent et où on libère l'énergie potentielle de l'eau.

Dans cet exemple, si « m » est la masse de l'eau qu'on libère, l'énergie potentielle « E » que cette masse d'eau avait avant d'être libérée est égale au produit de son poids, soit « mg » (mg étant égal à la masse de l'eau multipliée par l'accélération g de la pesanteur) par la hauteur de la chute « h » :

18 Barrage du Chastang dont on a ouvert les vannes de l'évacuateur de crue

Un beau spectacle, mais quel gaspillage d'énergie... heureusement il ne s'agissait que d'un essai !

5-1 L'ÉNERGIE CINÉTIQUE « ORDONNÉE » ET L'ÉNERGIE CINÉTIQUE « DÉSORDONNÉE »

Rien n'étant décidément simple, en plus de la distinction entre l'énergie cinétique, l'énergie associée au mouvement, et l'énergie potentielle, l'énergie dormante qui attend d'être libérée pour travailler, il convient de faire une autre distinction entre deux types d'énergie cinétique :

- l'énergie cinétique relative à des objets de taille macroscopique, des objets qui sont à notre échelle, des objets que l'on peut manipuler, voir et dénombrer,

- l'énergie cinétique relative à des objets de taille microscopique, des particules, atomes ou molécules, que l'on ne peut pas dénombrer compte tenu de leur taille et du nombre gigantesque de particules contenues dans la moindre parcelle de matière.

Ce n'est pas par souci de rigueur qu'il convient de faire cette distinction mais bien parce qu'il s'agit de deux manières dont l'énergie cinétique se présente à nous. Dans le premier cas (celui des objets macroscopiques) on reste dans le domaine de la mécanique classique, dans le second cas (celui des objets microscopiques) on entre dans celui de la physique statistique.

5-1-1 L'énergie cinétique ordonnée est associée à la notion de travail

L'énergie cinétique ordonnée est l'énergie que possèdent les objets de taille macroscopique en mouvement. De tels objets sont accessibles à l'observation, leur taille est très supérieure à celle à celle d'un atome ou d'une molécule, il est aisé de les individualiser et d'en déterminer individuellement la masse m et la vitesse V tant en grandeur qu'en direction et donc l'énergie cinétique : E = ½ mV².

L'énergie « cinétique ordonnée » est associée à la notion de « travail ».

C'est l'énergie cinétique que possède la masse d'un marteau. Au moment du choc (si possible sur le clou !) le marteau communique cette énergie au clou afin de vaincre les forces de frottement qui s'opposent à son enfoncement dans la planche. C'est l'énergie cinétique d'une voiture en mouvement. Pour l'arrêter au feu rouge il faut dissiper cette énergie par freinage. Lors du freinage, l'énergie cinétique de la voiture est transformée en chaleur dégagée par les freins.

⊕ Deux exemples d'énergie cinétique ordonnée

5-1-2 L'énergie cinétique « désordonnée » est associée à la notion de chaleur

L'énergie cinétique désordonnée est celle que possèdent des particules microscopiques de la taille des atomes, des molécules ou de grains microscopiques.

Dans le moindre ensemble de particules microscopiques, leur nombre est gigantesque. Songeons en effet qu'un simple verre contenant 18 grammes d'eau renferme 602 000 000 000 000 000 000 000 (soit 6,02 10²³) molécules !

Au sein d'un tel ensemble les particules ne sont pas observables individuellement d'autant qu'elles s'agitent en tous sens de manière parfaitement désordonnée, chacune ayant un mouvement différent des autres particules, une vitesse et donc une énergie cinétique qui lui est propre. Il est donc parfaitement illusoire de vouloir connaître à tout instant la trajectoire, la vitesse et donc l'énergie cinétique de chaque particule, d'autant que celles-ci ne cessent de se télescoper et de changer en permanence de direction. A titre d'exemple, à la température ambiante de 20°C, chaque molécule d'un gaz télescope ses voisins environ 5 milliards de fois par seconde !.

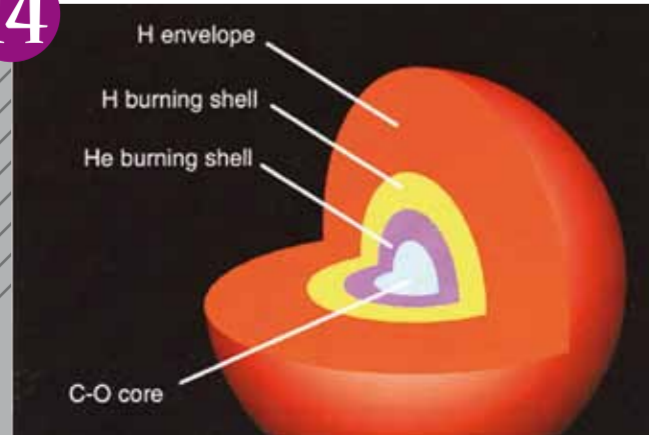
La seule méthode permettant à d'y voir un peu clair » au milieu de cette folle agitation est de renoncer à vouloir traiter individuellement chaque particule et de traiter globalement l'ensemble des particules, « en gros », c'est-à-dire de manière statistique.

Fort heureusement, à la fin du XIX^{ème} siècle, les physiciens ont montré que l'énergie cinétique moyenne d'un ensemble de particules de taille atomique était directement liée à la température moyenne de cet ensemble.

Cette découverte permit de sortir de l'impasse, d'accéder de manière statistique à la connaissance de l'énergie « cinétique désordonnée » des atomes ou des molécules des gaz, des liquides ou des solides par le biais de la mesure de la température moyenne de ces gaz, liquides ou solides.

Plusieurs techniques de mesure de la température, par contact ou à distance, sont disponibles pour la mesure des températures moyennes, chaque technique étant adaptée à la plage de température à mesurer : thermomètre, thermocouples, mesures optiques, spectromètres...

14 Structure schématique en « pelure d'oignon » du centre d'une étoile géante

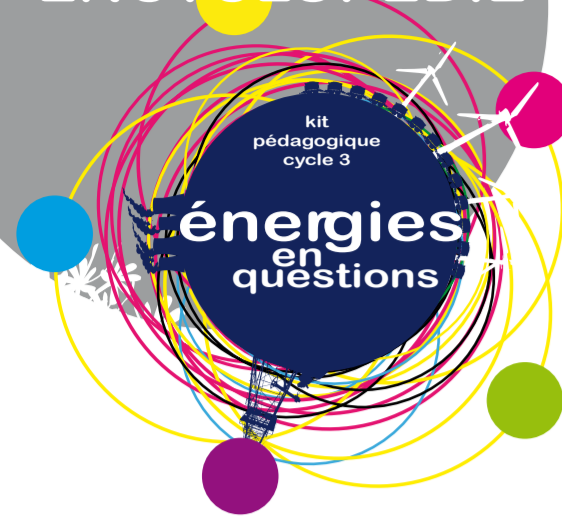


15 Explosion d'une étoile géante (supernova) NGC6751 dans la Constellation Aquila



18 Barrage du Chastang dont on a ouvert les vannes de l'évacuateur de crue





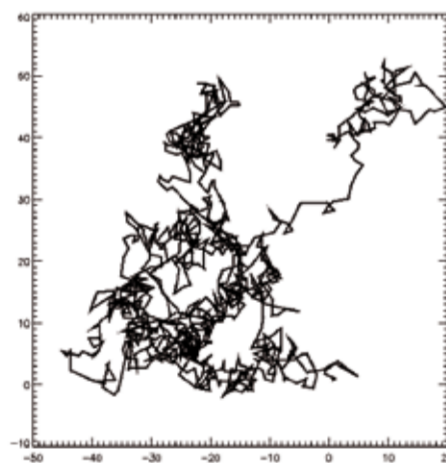
La notion d'énergie **cinétique désordonnée** est beaucoup plus difficile à appréhender que la notion d'énergie **cinétique ordonnée** mais elle est capitale car elle est liée à la notion de « **chaleur** » et est à la base du fonctionnement de toutes les machines dites thermiques, moteurs à combustion interne, turbines à gaz ou à vapeur... etc.

C'est également cette énergie qui régit, sous forme de chaleur, le fonctionnement de la gigantesque machinerie climatique, les transferts d'énergie entre les différentes régions du globe, les mouvements de l'atmosphère (les vents) et ceux des courants marins, les échanges thermiques entre l'atmosphère et les océans, les phénomènes d'évaporation et de condensation à l'origine des précipitations... etc.

5-2 RELATION ENTRE LA TEMPÉRATURE ET L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DÉSORDONNÉE

5-2-1 Le mouvement brownien

Du point de vue du physicien, l'énergie cinétique désordonnée est celle que possèdent les particules d'un liquide ou d'un gaz animées d'un mouvement, dit **mouvement brownien**, découvert par le botaniste Robert Brown (1773-1858) qui mit ce phénomène en évidence en observant le mouvement désordonné de minuscules grains de pollen à la surface de l'eau. Reportons-nous à une époque où l'on ne connaissait pas encore l'existence des atomes, bien que cette hypothèse fût déjà dans l'air du temps. Dans ce contexte Robert Brown émit l'hypothèse que le mouvement aléatoire des grains de pollen qu'il observait était dû à des particules invisibles, trop petites pour être vues, qui venaient heurter ces grains de pollen. La théorie de ce mouvement brownien se vérifia ultérieurement lorsque la théorie atomique fut unanimement admise et que les « particules invisibles » de Brown furent identifiées comme étant les molécules du liquide sur lequel flottait le pollen. Le mouvement désordonné des grains de pollen a pour origine l'impulsion que leur communique l'agitation des molécules du liquide.



19 Le mouvement brownien : trajectoire d'un grain de pollen à la surface de l'eau

La théorie du mouvement brownien ne fut définitivement établie qu'en 1906 par Einstein et Smoluchowski. Sa découverte fut parmi celles qui permirent au début du XX^{ème} siècle d'ap-

porter la preuve de l'existence des atomes et de valider définitivement la théorie atomique.

Le mouvement brownien de translation des molécules gazeuses de l'air (80% d'azote et 20% d'oxygène) est totalement chaotique et stupéfiant. A la température ordinaire de 20°C, la vitesse moyenne de déplacement de chacune de ces molécules est voisine de 500 mètres par seconde (soit 1 800 kilomètres par heure !). Compte tenu des très faibles distances séparant deux molécules gazeuses voisines, on calcule que chaque molécule entre en collision avec ses voisines environ... 5 milliards de fois par seconde !

Sachant qu'à cette température il y a environ 30 000 000 000 000 000 000 000 000 molécules dans un seul litre d'air et que chaque molécule fait 5 milliards de rencontres par seconde... on imagine la « cohue » qui règne dans les airs, autour de nous et jusque dans nos narines ! Pour avoir une idée du nombre de « rencontres » entre molécules dans 1 litre d'air et par seconde, il suffit de multiplier le nombre de molécules ci-dessus par 5 milliards... on obtient un nombre qui commence par 150 et qui est suivi de 30 zéros !

Il est vraiment désobligeant, et un tantinet exagéré, de comparer l'agitation fébrile et souvent inutile de quelqu'un au mouvement brownien !

Pour les gaz et les liquides, en plus de leur mouvement de translation désordonné, les molécules sont aussi animées de mouvements de rotation sur elles-mêmes. Outre leur énergie cinétique de translation, elles possèdent également une énergie cinétique de rotation. Elles disposent donc de six degrés de liberté, trois de translation selon les trois directions de l'espace et trois de rotation selon trois axes orthogonaux. L'énergie cinétique d'une molécule est égale à la somme de toutes les énergies cinétiques de translation et de rotation selon les trois directions de l'espace et les trois axes associés à ces directions.

Dans les solides, les atomes sont prisonniers de la structure du solide ou du cristal à l'intérieur duquel ils se trouvent : ils ne peuvent pas se déplacer librement en translation. Leur déplacement se limite à une vibration autour de la position moyenne fixe qu'ils occupent au sein du solide. Par contre, tout comme les gaz et les liquides, les atomes des solides sont animés de mouvements de rotation sur eux-mêmes (voir paragraphe 6-3 les effets de la température sur les solides).

Le mouvement brownien

5-2-2 L'agitation thermique et le zéro absolu

Le physicien Boltzmann (1844-1906), le père de la physique statistique, montra que l'énergie cinétique des molécules d'un gaz, d'un liquide ou celle des atomes d'un solide est proportionnelle à la **température absolue** « **T** » de ce gaz, liquide ou solide.

La température absolue « **T** » s'exprime en degrés Kelvin (°K), l'origine de l'échelle Kelvin des températures est le « zéro absolu » (-273,15 °Celsius). Le zéro absolu est la température la plus basse qui puisse exister dans l'Univers. Au zéro absolu, l'énergie cinétique (l'agitation thermique) de toute molécule ou atome est nulle, la matière y est parfaitement immobile.

L'échelle des températures couramment utilisée est l'échelle des degrés Celsius (symbole °C). Le 0 de cette échelle correspond à la température de la glace fondante et le 100 à celle de l'ébullition de l'eau. Le 0 de l'échelle Kelvin des températures absolues correspond à -273,15 °C. On convertit les degrés Celsius en degrés Kelvin en ajoutant 273,15 aux températures exprimées en degrés Celsius. Dans l'échelle Kelvin, la glace fond à 273, 15 °K et l'ébullition de l'eau a lieu à 373,15 °K.

On appelle « **agitation thermique** » les mouvements de translation et de rotation des molécules des gaz et des liquides. La relation entre l'énergie cinétique totale **Ec** d'une molécule gazeuse (c'est-à-dire la somme des énergies cinétiques de translation et de rotation de la molécule) et la température absolue **T** s'écrit simplement

Ec = k T (où k est une constante)

« **k** » est appelée constante des « gaz parfaits » ou de Boltzmann, à qui l'on doit d'avoir établi cette loi.

La signification physique de cette loi est la suivante : la vitesse de déplacement des molécules augmente ainsi que leur énergie cinétique avec la température. L'augmentation de l'**agitation thermique** qui en résulte se traduit **physiquement par une dilatation** des gaz, des liquides, il en est de même pour les solides :

- dans un thermomètre le niveau du mercure ou de l'alcool coloré « monte » dans la colonne du thermomètre lorsque la température augmente,
- les gaz se dilatent lorsque la température augmente. Si un gaz est contenu dans un réservoir dont le volume ne varie pas ou très peu en fonction de la température (un pneu par exemple), l'augmentation de la température et donc de l'agitation thermique se traduira par une augmentation de pression du gaz dans ce réservoir. L'augmentation de pression exprime simplement le fait que la vitesse des molécules du gaz augmentant avec la température, il s'ensuit une augmentation du nombre de chocs de ces molécules contre les parois du réservoir ainsi que de la violence de ces chocs. La violence est quant à elle liée à la **quantité de mouvement** de chaque molécule, la quantité de mouvement étant égale à la masse **m** de la molécule que multiplie sa vitesse **V**, vitesse qui croît avec la température.

6) Quelques curiosités et compléments utiles

6-1 LA THERMODYNAMIQUE

La thermodynamique est la branche de la physique et de la chimie qui étudie les relations entre l'énergie sous ses différentes formes, thermique (**chaleur**) et mécanique (**travail**), et les lois générales (**les principes**) qui régissent les transformations et les échanges d'énergie entre différents systèmes. C'est à partir des lois résultant des études et des expériences menées sur les gaz que naquit au XIX^{ème} siècle cette discipline de la physique.

Les **principes de la thermodynamique** établissent qu'au cours des transferts d'énergie entre systèmes il y a quantitativement **conservation de l'énergie** mais que la « **qualité** » de **l'énergie se dégrade inéluctablement et de manière irréversible**.

Ces principes établissent également que dans un système (une machine) la transformation de l'énergie en travail nécessite l'existence d'une **source chaude** (la chaudière de la locomotive à vapeur) qui fournit l'énergie à l'amont de la machine et d'une **source froide** située à l'aval dans laquelle la machine restitue une partie de l'énergie qu'elle a reçue. Pour une locomotive à vapeur la « source froide » est l'atmosphère, pour un moteur de voiture c'est essentiellement la sortie du pot d'échappement et son radiateur.

Le travail fourni par un système, une machine, est au plus égal à la différence entre l'énergie fournie à la machine par la source chaude et l'énergie qu'elle restitue à la source froide. C'est en étudiant la structure et le fonctionnement des machines thermiques que Sadi Carnot (1796-1823) établit le lien entre la chaleur et le travail et qu'il établit le second principe de la thermodynamique qui permet de calculer le **rendement énergétique** maximum d'une machine en fonction de la température de ses sources chaudes et froides.

Le rendement d'une machine est le rapport entre l'énergie fournie par la machine sous forme de travail d'une part et l'énergie fournie à l'amont à la machine par la source chaude d'autre part. Ce **rendement ne peut être qu'inférieur à 1**.

Si Tc et Tf respectivement les températures des sources chaudes et froides exprimées en degrés Kelvin, le rendement théorique maximum est égal à 1 - Tf/Tc ou (Tc-Tf)/Tc. On constate que plus l'écart Tc-Tf entre les températures des deux sources, chaudes et froides, est grand, meilleur est le rendement de la machine.

Sauf si la température de la source froide est égale au zéro absolu, le rendement théorique (et a fortiori le rendement réel !) d'une machine ne peut être qu'inférieur à 1. Le « mouvement perpétuel » dont certains rêvent ne pourrait se concevoir que s'il existait un endroit de l'Univers où il soit possible de trouver une source froide à une température **rigoureusement égale au 0 °K... une source froide qui resterait à cette température malgré l'énergie que lui restituerait la machine !** Une chimère !

L'**efficacité énergétique** est la recherche de l'amélioration des rendements des processus industriels et domestiques étendue à l'ensemble des usages de l'énergie, par exemple la diminution des pertes calorifiques en matière de logement.

6-2 L'APPROCHE DU ZÉRO ABSOLU

Au voisinage du zéro degré absolu (-273, 15°C) les propriétés physiques de certains matériaux changent de manière surprenante et deviennent parfois très étranges. Ainsi à des températures de quelques degrés Kelvin certains matériaux deviennent supraconducteurs de l'électricité, ce qui permet de faire circuler des courants de très forte intensité dans des conducteurs de très petit diamètre réalisés à l'aide de ces matériaux. Les applications de la supraconductivité sont multiples, grâce à elle, à l'aide d'électroaimants cryogéniques, il est par

exemple possible de créer les champs magnétiques intenses nécessaires à l'imagerie médicale. Le zéro absolu est une température limite qu'il est extrêmement difficile d'approcher. En laboratoire, des expériences complexes utilisant des lasers ont permis de s'en approcher à seulement quelques millièmes de degré. Un exploit qui valut en 1997 le prix Nobel de physique au physicien français Claude Cohen-Tannoudji.

Les techniques cryogéniques aux très basses températures sont également utilisées dans les grands accélérateurs de particules, au LHC du CERN, pour créer des champs magnétiques très intenses. Ces techniques sont utilisées dans les satellites Plank et Herschel lancés en mai 2009 pour l'étude des fluctuations du rayonnement fossile de l'univers ou pour l'étude des galaxies lointaines et des nuages de gaz et de poussières (à des températures voisines de 10°K) au sein desquels se forment de nouvelles étoiles. Les appareils de mesure des températures de ces satellites, les bolomètres, sont capables de mesurer des variations de température de l'ordre du milliardième de degré dans les domaines des rayonnements infrarouges et millimétriques. Ils nécessitent pour ce faire d'être maintenus à des températures de quelques dixièmes de degrés au-dessus du zéro absolu.

6-3 LES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE SUR LE RAYONNEMENT ÉMIS PAR LES SOLIDES

Les mouvements des molécules d'un gaz sont libres. Une augmentation de la température provoque une augmentation de leur agitation thermique, de leur vitesse de translation et de rotation sur elles-mêmes.

Dans un solide, les atomes sont prisonniers de la structure du solide ou du réseau cristallin dans lequel ils se trouvent, ils ne peuvent donc pas se déplacer librement en translation. Ne pouvant se déplacer en translation, les atomes d'un solide vibrent autour de leur position moyenne à une fréquence qui est fonction de la température. Cette vibration des atomes se traduit par l'émission d'un **rayonnement électromagnétique**, par l'émission de « **photons** ». La fréquence de ces photons et leur énergie augmentent avec la température. L'énergie « **E** » du rayonnement électromagnétique émis en fonction de sa fréquence « **v** » est donnée par la relation :

E= hv

Où « h » est la constante de Planck.

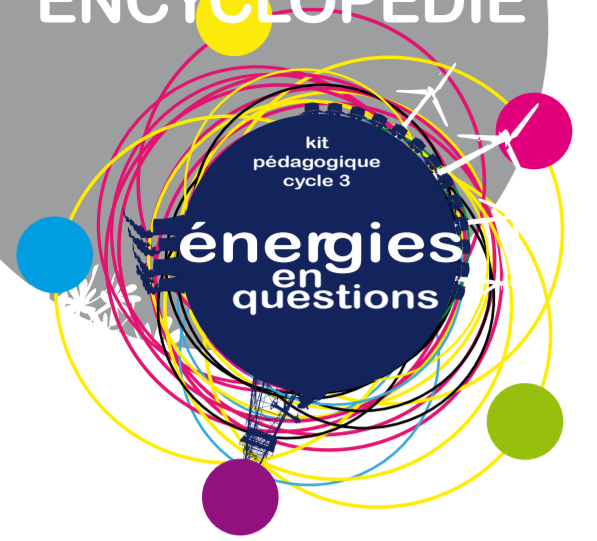
Aux températures modérées entre 100 et 200°C, celle d'un fer à repasser par exemple, un solide émet un rayonnement dans le domaine de l'infrarouge. L'œil ne perçoit pas ce rayonnement mais celui-ci est perçu par le derme de la peau, le rayonnement donne une impression de « chaleur ».

Aux températures plus importantes, un solide émet un rayonnement à des fréquences plus élevées, d'autant plus élevées que la température sera elle-même élevée. Pour les solides, au-delà de quelques centaines de degrés Celsius, le rayonnement est émis dans le domaine de fréquences de la lumière visible, perceptibles par l'œil. Par exemple, pour l'acier, sa couleur commence par virer au rouge sombre puis, la température augmentant, elle vire au « rouge cerise » indiquant au forgeron que la bonne température est atteinte pour la trempe de l'acier. Au fur et à mesure de l'augmentation de la température, le domaine de l'émission lumineuse se décale vers un rouge de plus en plus clair, puis vers l'orange et le jaune avant d'atteindre la température de fusion de l'acier. A 1 300 °C, le bain de fusion de l'acier émet un rayonnement d'une couleur jaune presque blanche. Grâce à la lumière émise, à sa couleur, il est possible de mesurer la température de l'acier, sans contact et à distance, en mesurant à l'aide d'un pyromètre optique la fréquence de cette lumière.

Le filament de tungstène des lampes à incandescence est porté à une température proche de 2500°C, il émet une lumière blanche. La surface du Soleil émet également une lumière blanche dont le spectre est caractéristique d'une température de surface voisine de 6 000°K. Au risque d'effrayer (mais il n'y a vraiment pas de quoi !) il faut noter que tout atome ou toute molécule émet un rayonnement électromagnétique dès lors que sa température est supérieure au zéro absolu, ce qui revient à affirmer que tous les atomes de l'Univers émettent un rayonnement électromagnétique... y compris les atomes et les molécules dont notre corps est constitué ! Aux températures ordinaires couramment rencontrées sur notre planète, l'émission a lieu dans l'infrarouge.

Notre corps émet dans l'infrarouge ! C'est le rayonnement que captent les caméras infrarouges capables de « voir dans le noir », dans le domaine de la lumière non visible, et que détectent les nouveaux thermomètres médicaux à infrarouge sans contact. Attention ! Si la longueur d'onde du rayonnement infrarouge que vous émettez est inférieure à 9,320 micromètre, essayer dans un premier temps l'Effergal ou le Doliprane car votre température est supérieure à 38 °C ! Si votre rayonnement persiste à rester en dessous de cette longueur d'onde, consulter votre médecin !

Rayonnements émis par les solides



Le soleil

1) Le Soleil source d'énergie et de vie

Le soleil est directement ou indirectement la source de toute l'énergie que nous consommons à deux exceptions près :

- l'énergie d'origine géothermique provenant de la chaleur accumulée lors de formation de la Terre est celle produite par la désintégration radioactive naturelle de l'uranium et de ses descendants,
- l'énergie nucléaire libérée par la fission des atomes d'uranium.

L'énergie qui nous vient du Soleil se manifeste de deux manières :

a) Directement sous forme de rayonnement électromagnétique, **la lumière et les infrarouges**. La lumière visible est la seule partie du rayonnement solaire perceptible par nos sens. Cette lumière blanche est composée de rayonnements de couleurs différentes, son **spectre** (figure 1) s'étend du rouge jusqu'au violet en passant par le jaune, le vert et le bleu. Respectivement, au-delà du rouge et du violet, se trouvent les rayonnements infrarouges et ultraviolets, ils ne sont pas visibles.

1 Spectre de la lumière visible émise par la Soleil

La lumière est la source unique qui fournit l'énergie nécessaire à la croissance du monde végétal, à la « **biomasse** » (un chapitre de cette encyclopédie lui est consacré). A partir de l'eau contenue dans les cellules des plantes et du gaz carbonique de l'atmosphère, la **photosynthèse** génère la biomasse qui constitue la nourriture de base du monde animal terrestre et marin et indirectement celle des prédateurs carnivores... dont les hommes, qui mangent les précédents ! La biomasse récente se présente sous forme de **flore et de faune terrestres** ou **maritimes**. La biomasse ancienne, qui s'est formée au cours des ères géologiques, se présente sous une **forme fossilisée** : charbon, lignite, pétrole ou gaz naturel.

b) La « **machine climatique** » est la seconde forme sous laquelle l'énergie du Soleil se manifeste sur Terre

L'énergie en provenance du Soleil ne se répartissant pas de manière uniforme à la surface du globe, des déséquilibres d'origine thermique se créent. Ils ont pour effet d'animer les mouvements des énormes masses d'air de l'atmosphère et de l'eau des océans et, au travers de ces mouvements, de transférer l'énergie depuis les régions excédentaires en énergie (équateur et tropiques) vers les régions déficitaires (hautes latitudes et pôles). Ces déséquilibres sont les moteurs **des vents, des courants marins, et des précipitations...**

Le rayonnement solaire direct (créateur de la biomasse actuelle ou fossilisée) ou indirect (moteur des vents, des courants et des précipitations...) constitue l'essentiel des ressources énergétiques renouvelables ou fossilisées que l'Homme utilise pour répondre à ses besoins énergétiques.

2) Le Soleil, sa formation, son fonctionnement

Le soleil est une « étoile de seconde génération » qui s'est formée il y a 4,55 milliards d'années par la contraction, sous l'effet de forces gravitationnelles, d'un nuage de gaz et de poussières provenant de l'explosion d'étoiles plus anciennes, les Supernovæ. Ce nuage primitif, constitué essentiellement d'éléments légers, hydrogène, deutérium et hélium devait très certainement être semblable à la « Pouponnière de la Rosette » de la figure 2.

2 Pouponnière d'étoiles dans la Nébuleuse de la Rosette

Sous sa forme actuelle, le Soleil est une énorme masse gazeuse de forme sphérique dont le diamètre est voisin de 1,4 million de kilomètres (soit 3,5 fois la distance de la Terre à la Lune). L'équilibre de cette sphère est assuré par l'antagonisme entre des forces d'attraction gravitationnelles qui ont tendance à faire s'effondrer le Soleil sur lui-même et des forces qui, au contraire de la gravitation, ont tendance à en provoquer l'expansion. Ces dernières sont générées par l'énorme pression régnant au sein du Soleil, par les gaz portés à des températures de plusieurs millions de degrés. L'ensemble de ces forces s'équilibre (au moins pour l'instant !) donnant sa forme sphérique au Soleil. Il n'en sera pas toujours ainsi comme il sera expliqué ci-après... hélas pour le devenir de notre planète !

L'effondrement gravitaire sur lui-même du nuage primitif qui a donné naissance au Soleil a provoqué l'échauffement des éléments qui le constituaient et, lorsque la température de ces éléments a atteint plusieurs millions de degrés, des réactions de fusion thermonucléaire ont pu s'amorcer. En langage imagé, le Soleil s'est « allumé ». Ces premières réactions ont eu pour effet d'augmenter de nouveau la température du gaz au centre du Soleil jusqu'à atteindre des températures de l'ordre de 15 millions de degrés. A ces températures, la fusion entre les noyaux d'hydrogène s'auto-entretient pour former de l'hélium. C'est présentement la principale réaction qui se produit au sein du Soleil.

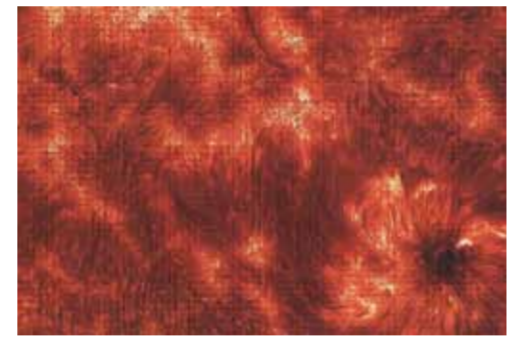
L'hydrogène du Soleil n'étant pas renouvelable, quel est le devenir du Soleil ? Le devenir du soleil (et le nôtre par la même occasion !) est parfaitement connu, il sera le même que celui de toutes les étoiles de masse comparable.

Lorsque son « carburant », l'hydrogène, ira en s'épuisant, la partie centrale du Soleil se contractera de nouveau (les forces de gravitation l'emportant très temporairement sur les forces d'expansion). Cet effondrement, tout comme au début de la vie du Soleil, aura pour effet d'augmenter encore un peu plus la température et la densité du Soleil en son centre jusqu'à amorcer un nouveau cycle de fusion s'effectuant à une température encore beaucoup plus élevée. En partant de l'hélium déjà formé à partir de l'hydrogène, ce cycle engendrera du carbone et de l'oxygène. Par la suite, le soleil évoluera de nouveau jusqu'à devenir une « géante rouge »,

son enveloppe extérieure subira une expansion démesurée qui ira jusqu'à englober la Terre... mais ceci ne se produira pas avant 5 milliards d'années !

Le destin d'une étoile et sa durée de vie étant entièrement prédéterminés par sa masse initiale, par la quantité de « carburant » qu'elle possède au moment de sa naissance, cette évolution est inéluctable ! Pour l'instant le soleil est encore constitué de 71 % d'hydrogène et de 27 % d'hélium. Cinq milliards d'années... d'ici là on a le temps de réfléchir à ce qu'il conviendra alors de faire !

3 Quelques chiffres qui donnent le tournis



3 La surface du Soleil : les taches solaires

Les taches solaires témoignent de la monstrueuse activité régnant à sa surface, chacune ayant une taille très supérieure à celle de la Terre

3) La lumière émise par le Soleil

La « **lumière blanche** » émise par le Soleil est en réalité composée d'une multitude de couleurs. La décomposition (la réfraction) de cette lumière par un prisme, ou par les gouttes d'eau de la pluie formant un arc en ciel, montre un « **spectre** » s'étendant de manière continue de la couleur violette à la couleur rouge, correspondant à des longueurs d'onde de 400 à 700 nanomètres (le nanomètre est le milliardième de mètre).

1 Spectre de la lumière visible émise par la Soleil

Le rayonnement du Soleil s'étend également dans des domaines de fréquence non perceptibles à l'œil. Dans les hautes énergies ce sont les domaines des **rayonnements ultraviolets, X et gamma** de très haute fréquence (et, à l'inverse, de longueurs d'onde très courtes, inférieures au dixième de micromètre). Dans les basses énergies ce sont les domaines des **rayonnements infrarouges**, perceptibles sous forme de **chaleur**, et des ondes radio. Les longueurs d'onde de ces émissions sont supérieures au micromètre (1000 nano mètre)

3 Pour en savoir plus Le rayonnement infrarouge non perceptible à l'oeil

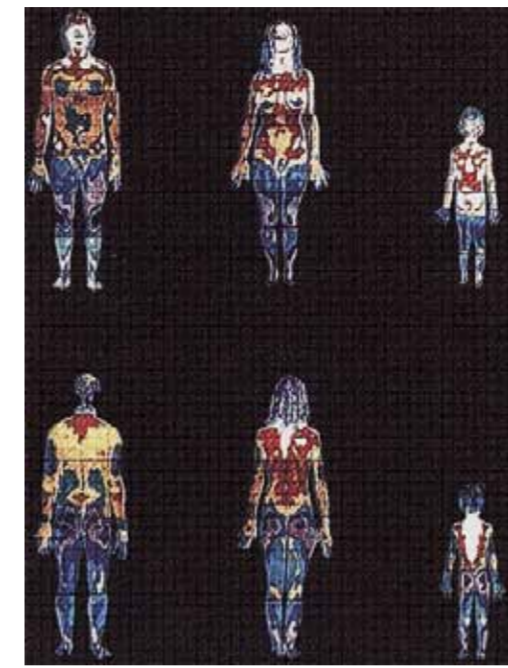
2 Pouponnière d'étoiles dans la Nébuleuse de la Rosette



3 Quelques chiffres qui donnent le tournis

Les conditions régnant au centre du Soleil sont proprement inimaginables pour les terriens que nous sommes. En son centre, la température est de 15,6 millions de degrés, la masse volumique du gaz (hydrogène et hélium) y est de 150 tonnes par m³. La pression qui règne au centre du Soleil est égale à 230 milliards de fois la pression atmosphérique... Bref, à côté, l'enfer tel qu'on se le représente n'est finalement qu'une douce et très agréable villégiature !

Fort heureusement pour notre Terre, et pour nous autres terriens, la température à la surface du Soleil est beaucoup plus modérée, elle « n'est que » de... 6 000°C. C'est cette température de la surface du Soleil qui détermine, entre l'ultraviolet et l'infrarouge, la composition, le spectre, de la lumière dite blanche qu'il émet (voir figure 1).



4 Thermographie du corps humain en fausses couleurs (le rouge correspond aux points les plus chauds)

3 Les rayons gamma et X



5 La couronne du Soleil et le flux de matière qui s'en échappe (vent solaire)

4) L'énergie que la Terre reçoit du Soleil

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil. Vue du Soleil elle n'est qu'un point microscopique, imperceptible ! Le Soleil émettant de manière uniforme son énergie dans toutes les directions, il est facile de concevoir que nous n'en recevons qu'une part infime. Bien que vue du Soleil cette part soit infime, vue par nous autres terriens, l'énergie reçue est considérable... L'énergie arrivant au sommet de l'atmosphère (de la stratosphère) varie peu en fonction de la position relative de la Terre qui décrit une ellipse autour du Soleil, elle varie de 1320 et 1410 W/m² selon la position de la Terre par rapport au Soleil, respectivement la plus éloignée (aphélie) et la plus proche (périhélie).

Les mesures spatiales faites par les satellites depuis les années 1960 montrent que cette énergie varie également peu, moins de 0,1% en fonction de l'activité solaire.

3 Pour en savoir plus Le rayonnement infrarouge non perceptible à l'oeil, application à la thermographie du corps

6 Le rayonnement infrarouge non perceptible à l'oeil, application à la thermographie du corps

Tout corps, tout objet, tout être vivant dont la température est supérieure au zéro absolu (c'est-à-dire au-dessus de -273,15° Celsius ou à 0° Kelvin), émet un rayonnement dont la longueur d'onde est fonction de sa température. Toutes les températures de l'Univers étant supérieures à 0°K, tout objet émet un rayonnement ! Chaque partie de notre corps émet un rayonnement dans le domaine infrarouge dont la longueur d'onde est fonction de sa température. A sa température normale de 37,5 °Celsius, le corps humain émet un rayonnement infrarouge d'une longueur d'onde voisine de 9,320 µm. C'est la variation de cette longueur d'onde en fonction de la température que mesurent

Il est important de souligner ce point car la variation de l'activité solaire est souvent mentionnée comme étant un facteur important intervenant dans le changement climatique. Les observations par satellites auraient donc tendance à infirmer l'importance des variations de l'activité solaire sur l'effet de serre et sur l'ampleur d'un éventuel changement du climat.

La valeur moyenne finalement retenue pour l'énergie arrivant au sommet de l'atmosphère est de 1 368 W/m². Cette valeur sert de base aux calculs des quantités d'énergie échangées entre le Soleil, la Terre et l'espace (voir le chapitre relatif à l'effet de serre) Compte tenu de la forme sphérique de la Terre, les rayons du Soleil arrivent différemment au niveau du sol en fonction de la latitude : perpendiculairement au sol à l'équateur, de manière oblique aux latitudes moyennes, tangentielle au voisinage des pôles et parfois même pas du tout, au-delà du cercle polaire, lorsque le Soleil ne s'y lève pas.

De ce fait, pour calculer la quantité d'énergie reçue du Soleil par la Terre, ce qui compte, ce n'est pas la surface de la Terre recevant le rayonnement solaire (soit une demi-sphère de 12 000 km de diamètre éclairée par le Soleil) mais la **surface apparente de la Terre vue du Soleil**, c'est à dire la surface d'un cercle de 12 000 km de diamètre qui recevrait le rayonnement solaire perpendiculairement à sa surface. L'incidence variable de l'arrivée des rayons du Soleil entre l'équateur et les pôles fait que, sur l'année au niveau des sols et en moyenne sur l'ensemble de sa surface, la Terre ne reçoit du Soleil qu'une énergie de 342 W/m².

Le rapport entre les 342 W/m² moyens reçus et les 1368 W/m² arrivant du Soleil au sommet de l'atmosphère correspond au rapport entre la surface apparente de la Terre vue du Soleil (un disque de 12 000 km de diamètre) et la surface de la portion sphérique de la Terre orientée vers le Soleil et éclairée (la surface d'une demi-sphère de 12 000 km de diamètre).

Un petit calcul rapide montre qu'au niveau du sol l'énergie reçue annuellement du Soleil est 15 000 fois supérieure à l'énergie annuellement consommée par l'ensemble de l'humanité ! D'où l'intérêt évident des énergies dites renouvelables. Le problème étant de capter ces énergies.

5) L'équilibre thermique de la terre, l'effet de serre

Sur un cycle d'une année, on constate que la température moyenne de la Terre reste constante, aux alentours de 15°C et que, malgré l'énorme quantité d'énergie reçue du Soleil pendant une année, la Terre n'est ni en ébullition ni en fusion...

Qu'est donc devenue toute cette fabuleuse énergie reçue du Soleil ? La réponse à cette interrogation est toute simple : l'énorme quantité d'énergie que la Terre reçoit en permanence du Soleil à travers l'espace est intégralement restituée... à l'espace. Retour à l'envoyeur !

S'il n'en était pas ainsi, l'énergie s'accumulerait et la température de la Terre ne ferait que croître. Très rapidement notre planète se transformerait en fournaise et la vie y deviendrait impossible ! La **Terre restitue donc intégralement à l'espace l'énergie qu'elle reçoit du Soleil** mais, et il faut insister dès à présent sur ce fait, elle restitue cette énergie avec plus ou moins de retard, toujours avec un certain délai. Provisoirement, pendant le jour, la Terre en accumule une partie avant de la restituer à l'espace, principalement pendant la nuit.

Nous reviendrons en détail sur la manière dont la Terre restitue l'énergie solaire à propos de l'**effet de serre**. Cependant, dès à présent présentons globalement les deux manières différentes dont s'effectue cette restitution d'énergie vers l'espace :

- la première est la **réflexion directe de la lumière vers l'espace**. Les nuages et les sols réfléchissent plus ou moins la lumière selon leur pouvoir réfléchissant. Ce pouvoir est caractérisé par un coefficient de réflexion appelé **albédo**. Par exemple, la neige, qui est un très bon réflecteur, réfléchit de 80 à 90% du rayonnement solaire, son albédo est de 0,8 - 0,9. L'albédo d'un sol couvert d'une végétation sombre, réfléchissant peu, est de l'ordre de 0,1 quant à celui d'un « corps noir parfait », qui ne restitue aucun rayonnement, il est de 0. L'albédo est un paramètre très important dans la détermination des conditions climatiques locales,

- la seconde est la réémission de l'énergie par **rayonnement infrarouge**. La lumière qui n'est pas réfléchié directement vers l'espace parvient au niveau de la basse atmosphère et des sols, où elle provoque leur échauffement. L'énergie lumineuse se transforme et s'accumule sous forme de « **chaleur** ».

Le premier point important à retenir est que l'énergie qui doit, tôt ou tard, être intégralement restituée à l'espace au travers de l'atmosphère, ne sera pas restituée sous forme lumineuse (la forme sous laquelle elle est parvenue) mais sous forme de **rayonnement infrarouge**.

Le second point, tout aussi important à retenir, est que si l'atmosphère laisse facilement passer la lumière en provenance du Soleil, elle laisse par contre difficilement passer le rayonnement infrarouge ce qui retarde la restitution de l'énergie reçue du Soleil vers l'espace.

En d'autres termes, l'atmosphère est transparente à l'énergie provenant du Soleil sous forme lumineuse, elle est partiellement opaque à l'énergie réémise par la Terre sous forme de rayonnement infrarouge.

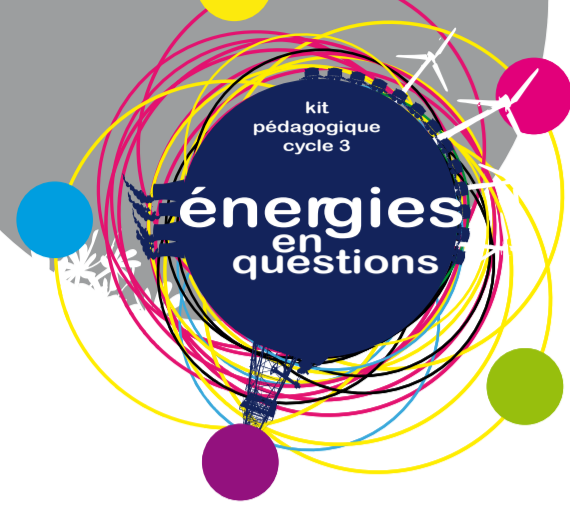
Il en résulte que la rapidité, plus exactement le retard, avec lequel le rayonnement infrarouge retourne vers l'espace, dépend de l'opacité de l'atmosphère à ce rayonnement. Plus l'opacité est importante, plus le retard apporté à la restitution de la chaleur accumulée vers l'espace est important. Cet effet retard a pour nom « **effet de serre** ».

L'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge est fonction de sa teneur en certains gaz, dits à effet de serre. La vapeur d'eau est de très loin le principal gaz à effet de serre. Les autres gaz sont le gaz carbonique, le méthane, les oxydes d'azote et de nombreux autres composés halogénés, chlorés, fluorés naturels ou résultant de l'activité humaine.

Les mécanismes de capture puis de restitution par la Terre de l'énergie solaire qu'elle reçoit ainsi que les bilans détaillés des différents transferts entre l'atmosphère, les océans, les sols et l'espace sont présentés aux chapitres consacrés à la « **Machinerie climatique** » et à « **L'effet de serre** ».

Ce sont des rayonnements électromagnétiques de même nature que la lumière visible, ils sont émis à des fréquences beaucoup plus élevées, l'énergie transportée par ces rayons est de ce fait beaucoup plus importante que celle transportée par la lumière. Par rapport aux matériaux inertes et aux tissus vivants ils sont plus pénétrants (radiographie et scanner...) Une exposition prolongée à ces rayons est nocive, c'est également le cas des rayons ultraviolets émis par le Soleil. Dans la nature, les rayons X et gamma sont les témoins accompagnant des événements astronomiques d'une violence inouïe qui se sont produits dans des zones de l'univers portées à de très hautes températures (à des centaines de milliers ou des millions de degrés). Les gigantesques cataclysmes que sont les explosions de supernovæ émettent de tels rayonnements. A contrario, les rayonnements infrarouges et submillimétriques (longueur d'onde inférieure au millimètre) sont émis par les régions froides de l'univers, par les nuages de poussières soumis à des températures très basses, de l'ordre de quelques degrés Kelvin. La lumière visible émise par la surface du Soleil et par celle des étoiles que nous percevons est représentative de températures de surface voisines de quelques milliers de degrés. Le Soleil émet également des particules électriquement chargées, des protons et des électrons. Le flux de ces particules constitue ce que l'on nomme de manière imagée le « vent solaire ». Fort heureusement pour la vie sur Terre, le champ magnétique terrestre nous protège partiellement du flux de ces particules électriquement chargées. Une partie d'entre elles parvient cependant jusqu'à nous, elle est à l'origine des magnifiques aurores boréales et des « orages électromagnétiques » qui perturbent parfois les liaisons radio.

3 Les rayons gamma et X



Les unités

1) Les trois grandeurs fondamentales de la physique classique

Au fur et à mesure de ses découvertes et de ses progrès, la physique élabore progressivement une représentation cohérente du monde matériel qui nous entoure, elle le décrypte et établit les lois qui rendent compte de son fonctionnement.

La physique « classique » décrit l'Univers qui nous est directement accessible, celui perceptible par nos sens. C'est l'Univers macroscopique, celui les « objets » que l'on peut dénombrer et caractériser par leurs dimensions, leur masse, leur position et leur mouvement (trajectoires, vitesse...) et dont on peut quantifier les échanges d'énergie s'effectuant entre eux.

Insistons une nouvelle fois sur le fait que la physique ne nous fournit pas la connaissance de l'essence même des « choses » qui peuplent l'Univers ni des « événements » qui s'y déroulent. La physique n'a pas cette prétention, elle les observe, les mesure, cherche à en comprendre la complexité à en démêler les liens, elle les modélise sous une forme mathématique... ce qui n'est déjà pas si mal !

Pour décrire cet Univers macroscopique et les phénomènes qui s'y déroulent, la physique classique utilise trois, et seulement trois, grandeurs fondamentales : les longueurs, les masses et les temps. Les unités qu'elle utilise usuellement sont adaptées à notre échelle humaine : le mètre pour les longueurs, le kilogramme pour les masses et de la seconde pour le temps.

Les longueurs caractérisent la forme et la position d'un objet dans l'Univers, la masse caractérise la quantité de matière contenue dans cet objet, son inertie.

Seuls, ces deux paramètres, longueur et masse, sont cependant dans l'incapacité de décrire et de rendre compte de l'animation de l'Univers, du mouvement des objets, de leur trajectoire, pas plus qu'ils ne peuvent rendre compte des transferts et des échanges d'énergie qui s'effectuent entre ces objets. Longueurs et masses ne sauraient décrire à elles seules qu'un Univers parfaitement statique, privé de toute agitation et donc de toute forme d'énergie. Elles ne pourraient décrire qu'un Univers éternellement immobile, condamné à un froid éternel (à la température du zéro absolu !), sans lumière et sans vie.

C'est l'intervention d'un troisième paramètre, le temps, qui permet d'animer la représentation que la physique nous donne de l'Univers, de décrire le mouvement et, par là même, de nous permettre d'approcher du concept d'énergie à travers l'énergie cinétique, c'est à dire l'énergie que possède de par sa vitesse tout corps ou particule en mouvement.

Précisons comment les trois grandeurs fondamentales interviennent dans la genèse du concept d'énergie. Rappelons tout d'abord qu'au chapitre consacré aux notions de physique, nous avons choisi une définition simple et utilisable de l'énergie, celle d'une « force en mouvement ».

A la suite de Newton, nous avons montré qu'une force appliquée à un objet modifie sa vitesse en lui communiquant une accélération. Les lois de la mécanique Newtonienne établissent qu'une force « F » communique à un objet de masse « m » sur lequel elle s'applique une accélération « a » et que F, m et a sont liées par la relation fondamentale $F = m \cdot a$.

Une accélération est une variation de vitesse dans le temps, la vitesse étant elle-même une distance (une longueur) parcourue en un certain temps, à travers cette relation reliant force et accélération, nous voyons que le paramètre temps intervient, au même titre que la longueur et que la masse, dans la notion physique de force.

Sachant que le concept d'énergie repose sur celui de « travail mécanique », et que le travail mécanique est lui-même défini comme le résultat d'une « force qui déplace le point sur lequel elle s'applique », on en conclut que le travail, ou l'énergie quelle qu'en soit la forme, sont physiquement assimilables à une force que multiplie le déplacement qu'elle effectue. En termes légèrement plus savants, le travail et l'énergie ont la « dimension » d'une force que multiplie une longueur. Voir ci-après le Savoir plus sur la formulation mathématique des grandeurs dérivées des trois grandeurs fondamentales.

Certains phénomènes étudiés par la physique sont caractérisés par d'autres grandeurs que les trois grandeurs fondamentales : par la température, par des grandeurs électriques (intensité, différence de potentiel...) ou magnétiques (intensité du champ...) etc. Cependant, grâce aux effets ou aux forces que ces phénomènes engendrent, il est toujours possible de quantifier ces grandeurs directement ou indirectement à l'aide des seules trois grandeurs fondamentales.

2) Les unités légales

2-1 LES TROIS UNITÉS FONDAMENTALES

La longueur :	le mètre	m
La masse :	le kilogramme	kg
Le temps :	la seconde	s



1 Les longueurs

On mesure les longueurs directement (règle, pied à coulisse...) ou indirectement par des méthodes optiques utilisant par exemple les lasers.



2 Les masses

A l'aide d'une balance on mesure la masse d'un objet en la comparant à des masses étalon de référence communément appelés « poids ». Plus couramment, de nos jours, les balances, généralement électriques, mesurent directement la force d'attraction (la pesanteur) que la Terre exerce sur la masse que l'on cherche à déterminer. Sans le dire, ou plus exactement sans le savoir... on convertit une force d'attraction (immatérielle) en masse (commercialisable !).



3 Le temps

Il existe une multitude de moyens de mesurer le temps depuis les cadrans solaires, les sabliers, la pendule de la cuisine jusqu'aux horloges atomiques. Le choix du moyen utilisé pour la mesure est fonction de la précision recherchée. Avec les horloges atomiques on sait actuellement mesurer le temps avec une précision de l'ordre du milliardième de milliardième de seconde (10^{-15} s). Les précisions atteintes sont nécessaires à la synchronisation des horloges des satellites de géolocalisation (GPS, aux réseaux d'internet...) La dérive des horloges actuelles dites « fontaines à atomes froids » sur la mesure du temps ne serait que d'une seconde tous les 300 millions d'années !

4 Le cœur d'une horloge atomique

2-2 LES UNITÉS UTILISÉES EN MÉCANIQUE

La vitesse : le mètre par seconde m/s ou ms⁻¹

L'accélération : le mètre par seconde, par seconde m/s/s ou ms⁻²

La force : le newton N

Le travail (ou l'énergie) : le joule J

La puissance : le watt W

2-3 LES UNITÉS ÉLECTRIQUES

La différence de potentiel : le volt V

L'intensité : l'ampère A

La Puissance : le watt W

Le watt correspond à l'énergie dégagée par un courant de 1 ampère sous une différence de potentiel de 1 volt.



5 Ampèremètre étalon à aiguille servant à la mesure de l'intensité d'un courant électrique.

Les appareils plus récents sont à affichage digital, ils sont moins beaux mais leur lecture est plus aisée !

2-4 QUELQUES COMPLÉMENTS SUR LES RELATIONS EXISTANT ENTRE LES DIVERSES UNITÉS

- L'unité de vitesse est le mètre par seconde (ms⁻¹), elle correspond à une distance de 1 mètre parcourue en 1 seconde. La vitesse est le quotient d'une longueur par un temps.

- L'unité d'accélération est le mètre par seconde, par seconde (symbolisé ms⁻²). Elle correspond à une variation de la vitesse d'un mobile de 1 mètre par seconde, par seconde.

Une accélération est le quotient d'une vitesse par un temps.

Cette variation de vitesse peut être positive (accélération) ou négative (décélération)

Dire que l'accélération de la pesanteur est de 9,81 ms⁻² signifie que la vitesse d'un corps en chute libre augmente chaque seconde de 9,81 mètre par seconde.

- L'unité de force est le newton. Le newton est la force qui communique à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre par seconde, par seconde.

Cette définition découle de l'intuition et du génie de Newton qui comprit qu'une force est le

produit d'une masse par une accélération. Selon la légende il déduisit sa célèbre formule « Force = Masse que multiplie une accélération » de l'observation des pommes qui tombent... c'est joli mais faux. En fait il reprit pour la compléter la notion d'inertie émise précédemment par Galilée !

- L'unité de travail (ou d'énergie) est le joule. Le joule correspond au travail d'une force de 1 newton qui déplace son point d'application de 1 mètre. Un travail correspond donc au produit d'une force par un déplacement.

On retrouve au travers de cette définition purement mécanique du travail ou de l'énergie (une force en mouvement qui déplace son point d'application) la notion intuitive que nous avons retenue pour tenter de définir l'énergie : « force en action ».

- L'unité de puissance est le watt. Le watt est la puissance d'un système qui fournit (ou absorbe) un travail de 1 joule par seconde.

Une puissance est le quotient d'un travail par un temps.

Le watt correspond à l'énergie dégagée par un courant de 1 ampère sous une différence de potentiel de 1 volt.

2-5 LES PRINCIPALES UNITÉS USUELLES MULTIPLES OU DÉRIVÉES DES UNITÉS LÉGALES

Longueur : le micromètre μm (millième de mètre ou 10⁻⁶ m).

Vitesse : le kilomètre par heure km/h.

Force : le déca newton (à peu près équivalent à l'ancien « kilogramme force » qui vaut 9,81 N)

Travail (ou énergie) : le kilowattheure (kWh) qui vaut 3 600 joules.

Pour quantifier l'énergie lorsqu'elle se manifeste sous forme de chaleur on utilise également la calorie qui vaut 4,18 joules. On utilise la calorie (bien connue du grand public !) sur l'étiquetage des denrées alimentaires pour indiquer leur valeur énergétique. Ainsi 100 grammes de corn flakes (... aux fruits rouges !) ont une valeur énergétique de 1603 kilo joule ou 378 kilo calorie. C'est l'énergie qui serait produite en brûlant directement les corn flakes ou beaucoup plus lentement... celle produite après digestion par l'organisme.

- L'unité de vitesse est le mètre par seconde (ms⁻¹), elle correspond à une distance de 1 mètre parcourue en 1 seconde. La vitesse est le quotient d'une longueur par un temps.

- L'unité d'accélération est le mètre par seconde, par seconde (symbolisé ms⁻²). Elle correspond à une variation de la vitesse d'un mobile de 1 mètre par seconde, par seconde.

Une accélération est le quotient d'une vitesse par un temps.

Cette variation de vitesse peut être positive (accélération) ou négative (décélération)

Dire que l'accélération de la pesanteur est de 9,81 ms⁻² signifie que la vitesse d'un corps en chute libre augmente chaque seconde de 9,81 mètre par seconde.

- L'unité de force est le newton. Le newton est la force qui communique à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre par seconde, par seconde.

Cette définition découle de l'intuition et du génie de Newton qui comprit qu'une force est le

Puissance :
le kilowatt,
le mégawatt (un million de watt, 10⁶ W),
le gigawatt (un milliards de watt, 10⁹ W),
le térawatt (mille milliards de watt, 10¹² W)

3) Multiples et sous multiples

Multiples :
Déca = 10
hecto = 100
kilo = 1000
méga = 1 000 000
giga = 1 000 000 000

Sous multiples :
Déci = 0,1
centi = 0,01
milli = 0,001
micro = 0,000 001
nano = 0,000 000 001

4) Unités relatives à la radioactivité et aux effets des rayonnements ionisants

4-1 L'ACTIVITÉ

L'activité d'une source radioactive est le nombre de désintégrations qui s'y produisent chaque seconde. Chaque désintégration est émettrice d'un rayonnement ionisant.

L'activité est une grandeur physique qui se mesure. Le becquerel (symbole Bq) est l'activité d'une source radioactive au sein de laquelle une désintégration se produit chaque seconde. Cette unité correspond à une activité infime. Du seul fait de la radioactivité naturelle (potassium 40, carbone 14...), l'activité du corps humain est de l'ordre de 100 à 110 Bq par kilogramme de tissus, soit de 6 000 à 8 000 Bq pour un adulte.

Initialement l'unité d'activité était le curie (symbole Ci). Le curie (activité d'un gramme de radium) équivaut à 37 milliards de becquerel. Contrairement au becquerel, le curie, une unité énorme !

L'activité d'une source radioactive ne permet pas à elle seule d'estimer l'effet biologique du rayonnement qu'elle émet.



6 Compteur Geiger servant à la mesure de l'activité d'une source radioactive

Il compte un nombre désintégrations radioactives par seconde (il compte des becquerels) et non l'effet des désintégrations sur l'organisme.

4-2 LA DOSE

Elle caractérise l'énergie déposée par un rayonnement ionisant émis par une source radioactive dans la matière, que celle-ci soit inerte ou vivante. L'unité de dose est le gray. Il correspond à une énergie de un joule déposée par kilogramme de matière.

C'est une unité utilisée en particulier par les radiothérapeutes pour le traitement des tumeurs. La dose est une grandeur physique qui se mesure.

4-3 L'ÉQUIVALENT DE DOSE OU DOSE EFFICACE

L'équivalent de dose, ou dose efficace, caractérise l'effet biologique d'un rayonnement sur un type particulier de cellules, sur un organe ou sur l'ensemble d'un organisme. L'unité d'équivalent de dose est le sievert (symbole Sv).

Pour les équivalents de dose importante (supérieure à 0,1 Sv) les études épidémiologiques montrent qu'il existe une relation entre l'exposition au rayonnement et la probabilité d'apparition d'effets biologiques (trouble de la numération sanguine, mutations...)

L'ancienne unité d'équivalent de dose était le rem. Le sievert équivaut à 100 rems.

Contrairement aux deux grandeurs physique mesurables que sont l'activité et à la dose, l'équivalent de dose ne se mesure pas, il se calcule.

Outre l'activité de la source émettrice, le calcul de l'équivalent de dose fait intervenir trois autres paramètres : le pouvoir ionisant du rayonnement, il est fonction de sa nature (α, β, γ ou neutronique), l'énergie du rayonnement émis et la nature du tissu ou de l'organe atteint par le rayonnement.

Le calcul de l'équivalent de dose est donc un calcul complexe relevant des spécialistes de la radiothérapie ou de la radioprotection. La notion d'équivalent de dose et la complexité du calcul en rendent la compréhension particulièrement difficile par le public dont la principale (et légitime) préoccupation est de savoir clairement si la radioactivité naturelle à laquelle s'ajoute les doses de radioactivité générées par les activités humaines (médicales et industrielles...) sont ou ne sont pas nocives.

⊕ Pour en savoir plus
La température, relations avec les trois grandeurs fondamentales

⊕ Pour en savoir plus
Expression mathématique et utilité de ces relations (analyse dimensionnelle)

⊕ Expression mathématique et utilité de ces relations (analyse dimensionnelle)

Si l'on symbolise :
- les longueurs par la lettre L, les masses par la lettre M et les temps par la lettre T
- la multiplication (X) est symbolisée par un exposant "a" précédé du signe positif (L^a, M^a ou T^a). Exemple d'exposant positif : L² = LxL
- la division (/) est symbolisée par un exposant "a" précédé du signe négatif (L^{-a}, M^{-a} ou T^{-a}). Exemple d'exposant négatif T⁻² = 1/TxT ou 1/T²

on obtient les relations suivantes entre les grandeurs fondamentales :
Vitesse (Longueur / Temps) LT⁻¹
Accélération (Vitesse / Temps) LT⁻²
Force (Accélération x Masse) MLT⁻²
Travail (Force x Longueur) ML²T⁻²
Puissance (Travail / Temps) ML²T⁻³

En apparence ces formulations paraissent assez esotériques (bien que les opérations ne soient que des multiplications ou des divisions !). Elles sont cependant très utiles lorsqu'on cherche à relier de manière cohé-

rente les grandeurs utilisées en mécanique, longueurs, masses temps, forces, travail et puissance à d'autres grandeurs servant à quantifier des phénomènes physiques dans les domaines de la thermique, de la thermodynamique ou de l'électromagnétisme.

Cette recherche (l'analyse dimensionnelle) permet de trouver la dimension des constantes qui relient certaines grandeurs que l'on rencontre en physique, constante « h » de Planck, « R » des gaz parfaits ou « k » de Boltzmann.

Exemple la constante h de Planck qui relie l'énergie d'un quanta de lumière (un photon) à la fréquence ν du rayonnement lumineux : E = hν
Sachant qu'une fréquence est l'inverse d'un temps (T⁻¹) et que la dimension de l'énergie E est ML²T⁻², on en déduit la dimension de la constante de Planck : ML²T⁻¹

⊕ La température, relations avec les trois grandeurs fondamentales

Tous les atomes ou molécules d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide sont en permanence animés de mouvements de rotation sur eux-mêmes et de translation (ou de vibration autour d'une position fixe pour les atomes d'un solide). Ces mouvements désordonnés, appelés agitation thermique ou mouvement brownien, s'effectuent à des vitesses (ou à des fréquences pour les vibrations) d'autant plus élevées que la température du gaz, du liquide ou du solide est élevée.

Chaque particule (molécule ou atome) ayant une masse et étant animé d'un mouvement, il en résulte que chaque particule possède une énergie cinétique, de translation et de rotation pour les gaz, de rotation et de vibration pour les solides. Reste à établir la relation existant entre la tem-

pérature et l'énergie cinétique des particules. Au XIX^{ème} siècle les pères de la physique statistique (la physique des particules microscopiques trop nombreuses pour qu'on puisse particulariser le comportement de chacune d'elles) ont établi que l'énergie cinétique moyenne des particules « Ec » d'un gaz était directement liée à la température « T » exprimée en degré Kelvin.

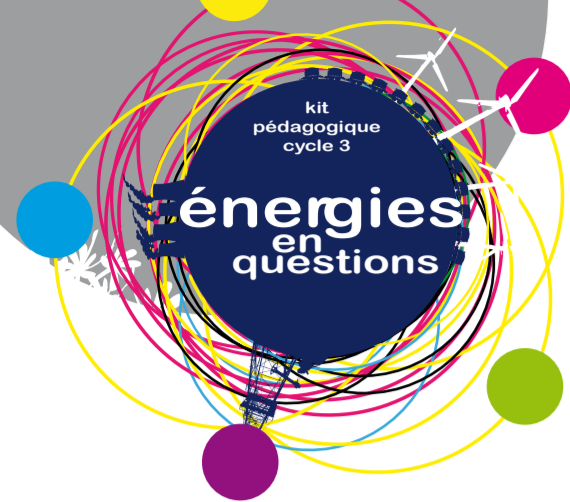
Ils ont également montré que la pression d'un gaz à l'intérieur d'un réservoir de volume constant était directement lié à sa température, ce qui n'a rien d'étonnant puisque la pression exercée par le gaz sur les parois du réservoir est engendrée par les chocs des molécules de ce gaz venant frapper les parois du réservoir et que la violence de ces chocs est d'autant plus élevée que la

vitesse des molécules est élevée et donc que... la température est élevée. Finalement il a été établi deux relations par lesquelles la température absolue (exprimée en degrés Kelvin) d'un gaz est reliée aux trois grandeurs fondamentales longueur, masse et temps par le biais de constantes :

- la première exprime l'énergie cinétique « Ec » moyenne des molécules d'un gaz en fonction de sa température absolue « T » : Ec = 3/2 kT où k est la constante de Boltzmann

- la seconde donne pour une certaine quantité de gaz (pour « n » moles de gaz) le produit de sa pression « p » par son volume « v » en fonction de la température absolue « T » : pv = n RT où R est la constante des gaz

parfaits. Plus généralement, pour les liquides et les solides, l'agitation thermique se traduit par une augmentation de leur volume, par leur dilatation. C'est ainsi, par exemple, que l'on peut mesurer une température par la dilatation d'une colonne de mercure ou d'alcool colorée placée dans le tube de verre d'un thermomètre. Pour les solides, l'agitation se traduit également, en plus de leur dilatation, par l'émission d'un rayonnement (la chaleur) dont la fréquence augmente avec la température, rayonnement infrarouge à température ambiante ou lumineuse à plus haute température. La relation entre l'énergie « E » du rayonnement émis et sa fréquence « F » étant : E = hF où h est la constante de Planck.



Au XIX^{ème} siècle Sadi Carnot (1796-1832) montre que pour qu'une machine thermique (moteur à explosion, locomotive ou turbine à vapeur...) puisse fournir un travail, il faut impérativement que cette machine soit reliée, à minima, à deux sources énergétiques, l'une dite « source chaude » et l'autre dite « source froide ». La température de la source froide étant obligatoirement inférieure à celle de la source chaude. Lorsque la machine fonctionne, elle reçoit une certaine quantité de chaleur de la source chaude et restitue une partie de cette chaleur à la source froide. La différence entre ces deux quantités de chaleur correspond à la quantité de chaleur utilisée par la machine pour produire un travail.

Carnot montre que le rendement théorique maximum (ρ) d'une machine thermique convertissant de la chaleur en travail est uniquement fonction des températures des sources chaudes (T_c) et froides (T_f), et que le rendement théorique maximum de la machine est donné par la relation ci-dessous.

$$\rho = 1 - T_f/T_c \text{ ou, forme équivalente, } \rho = (T_c - T_f)/T_c$$

Les températures sont exprimées en degrés absolus, en degrés Kelvin c'est-à-dire en degrés Celsius auxquels on ajoute 273°.

Exemple : le rendement théorique maximum d'une machine thermique (par exemple une turbine) dans laquelle la vapeur entre à 585 °C (soit 858°K) et en ressort au condenseur à 35°C (soit 308°K) est de 64 %.

D'un point de vue légèrement plus « philosophique », on constate que la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique s'effectue avec un rendement généralement assez faible, d'autant plus faible que l'écart ($T_c - T_f$) entre les températures des deux sources, chaudes et froides, est lui-même faible.

Par contre, et à l'inverse, la conversion de l'énergie mécanique en chaleur s'effectue toujours avec un excellent rendement. Les freins d'une voiture ont un excellent rendement, toute l'énergie cinétique du véhicule étant transformée en chaleur lors d'un freinage. Un rendement bien meilleur que celui global du moteur de la même voiture qui atteint péniblement 20 %.

Comme quoi il est plus facile de s'arrêter que de se mettre en mouvement !



Le rendement de Carnot

Systèmes énergétiques

1) Les énergies primaires

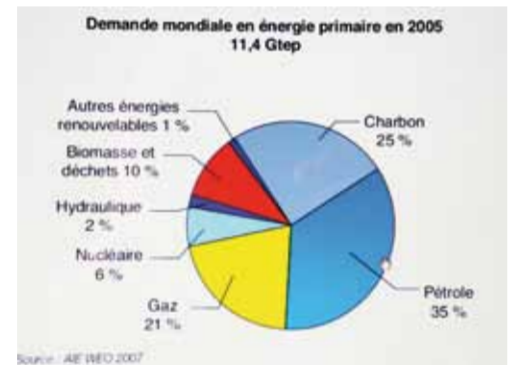
On appelle **énergie primaire** les différentes formes d'énergie que la nature met à notre disposition.

Les unes sont dites renouvelables, elles sont inépuisables et se renouvellent sans cesse. La lumière, la biomasse (les plantes, les arbres, les algues...), le vent, les courants marins, les chutes d'eau, la géothermie... sont des énergies primaires renouvelables.

D'autres ne se renouvellent pas, ce sont les énergies dites fossiles car issues au cours du temps de la transformation de la matière organique : le pétrole, les charbons, le gaz naturel. D'autres, également non renouvelables, proviennent de minerais : l'uranium, le thorium.

La figure 1 montre, qu'à l'échelle mondiale, le pétrole reste encore l'énergie primaire prépondérante soit 35% de l'énergie primaire consommée à travers le monde. Il est suivi du charbon (23,5%) et du gaz (21%). Les énergies fossiles représentent donc 80% de l'énergie primaire consommée par l'humanité.

La biomasse, essentiellement le bois, représente 11%, le nucléaire 6,8%, l'hydraulique, l'éolien et le solaire 2,7%.

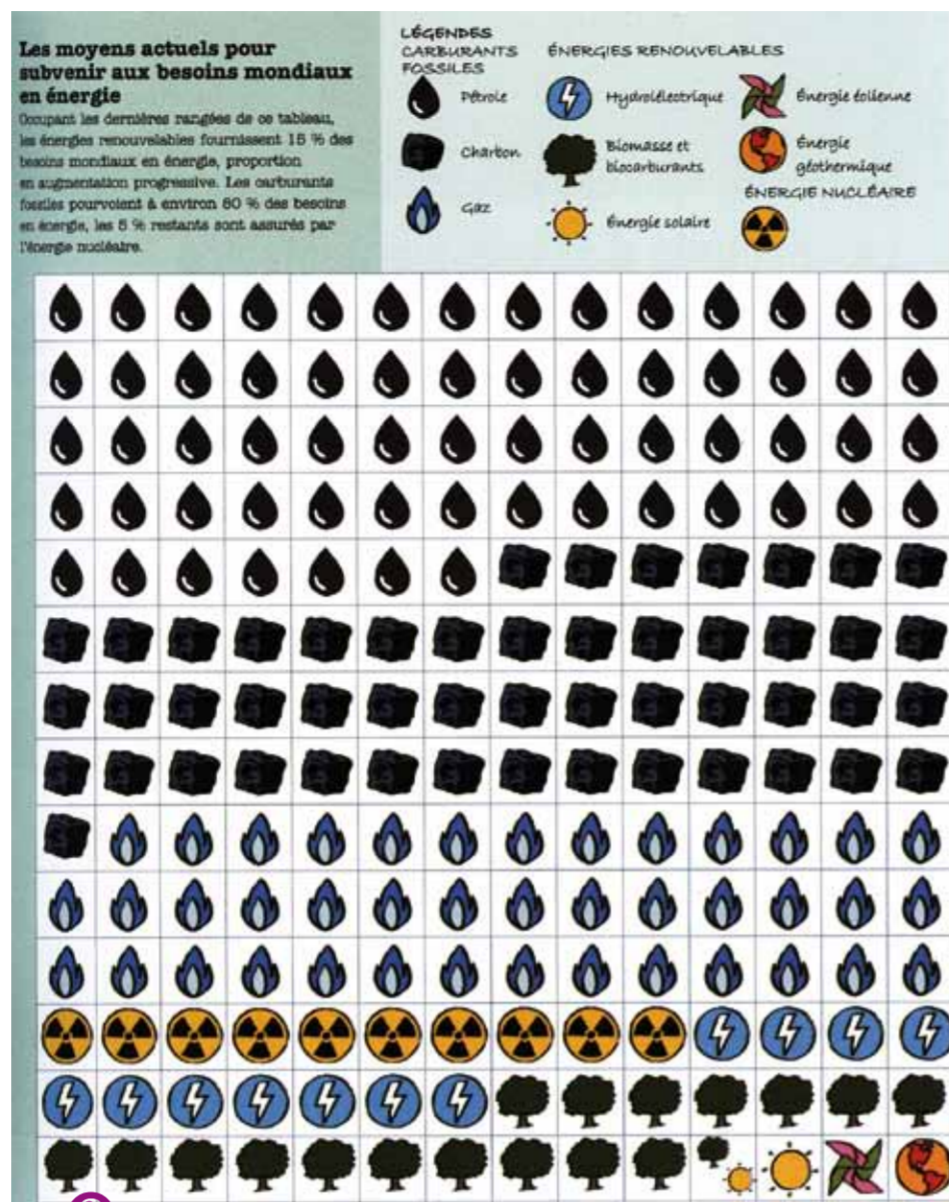


1 Importance relative (en %) des diverses énergies primaires.

En 2011, les énergies primaires ont fourni à l'humanité une énergie équivalente à la combustion de 12 milliards de tonnes de pétrole (12 Gtep).

Telle qu'elle se présente, à l'état naturel, une énergie primaire n'est généralement pas directement utilisable. Avant de pouvoir être utilisée, une énergie primaire doit subir un ensemble de conversions qui la transforment et la rendent commercialisable et directement « utilisable » par un consommateur final.

On appelle **système énergétique** l'ensemble de la chaîne des opérations qui permettent de transformer et de rendre utilisable, et donc commercialisable, l'énergie potentiellement contenue dans une ressource primaire.



2 Les moyens actuels pour subvenir aux besoins mondiaux en énergie

Par exemple, à partir du pétrole brut extrait d'un gisement situé au Moyen Orient, le système énergétique pétrolier permet, en bout de chaîne de fournir à la pompe un carburant. Il est constitué d'une succession d'étapes : extraction du pétrole brut depuis le gisement, transport par pipeline puis par pétrolier, raffinage et acheminement du produit fini vers le consommateur, commercialisation au travers d'un réseau de distribution.

Notons qu'en amont de cette chaîne pétrolière, il aura fallu au préalable prospecter, forer des puits de reconnaissance puis d'exploitation, construire des réseaux de transport par pipelines, équiper des ports pétroliers, créer des raffineries et des réseaux de distribution... etc.

Ce simple exemple montre la complexité de l'ensemble d'un système énergétique (voir figure 7).

2) Énergies renouvelables, énergies non renouvelables

Il convient de bien distinguer deux grandes catégories d'énergies primaires :

2-1 LES ÉNERGIES PRIMAIRES NON RENOUVELABLES, AU MOINS À L'ÉCHELLE DE LA VIE HUMAINE

Ce sont les combustibles miniers solides (charbon, lignite et tourbe), le pétrole conventionnel ou non conventionnel (schistes bitumineux, sables asphaltiques), le gaz naturel conventionnel ou non conventionnel (gaz de schiste), l'uranium (tel qu'on l'utilise aujourd'hui, sans surgénération) et le thorium un matériau abondant potentiellement utilisable dans des filières de réacteurs nucléaires qui restent à développer (actuellement étudiées en Inde).

2-2 LES ÉNERGIES PRIMAIRES RENOUVELABLES

A tout seigneur tout honneur, le Soleil est notre principal « fournisseur » d'énergie. L'énergie qu'il émet nous parvient sous forme de lumière. La lumière, comme tout rayonnement est un rayonnement électromagnétique se propageant comme une onde. Elle est de même nature que le rayonnement radio, micro-onde, infrarouge, ultraviolet, X ou gamma...

Le **rayonnement solaire** peut être capté et utilisé de plusieurs manières :

- soit directement via le **solaire thermique** (captation sous forme de chaleur) ou le **solaire photovoltaïque** (conversion en électricité),

- soit indirectement via la **photosynthèse** (le rayonnement solaire fournissant l'énergie nécessaire à la formation de la **biomasse**, bois, plantes ligneuses, céréales...), le vent (**énergie éolienne**), l'**énergie hydraulique** (chutes d'eau), les courants marins et la houle (**énergie mécanique des océans**). Ces diverses utilisations sont décrites en détail dans les différents chapitres consacrés aux énergies renouvelables.

Notons dès à présent que les énergies fossiles -charbon, pétrole et gaz - se sont formées au cours des âges à partir de biomasse terrestre ou océanique. L'énergie qu'elles nous fournissent aujourd'hui est la restitution de l'énergie solaire captée par la biomasse lors de sa formation il y a des millions d'années. Pétrole, charbon ou gaz ne sont donc que de l'énergie solaire fossilisée ! Seules quelques énergies primaires renouvelables n'émanent pas du rayonnement émis par le Soleil, ce sont :

- l'**énergie géothermique** provenant, d'une part, de la chaleur résiduelle accumulée pendant la formation de notre planète (dite chaleur d'accrétion) et, d'autre part, de la chaleur engendrée par la radioactivité naturelle, par la désintégration radioactive de deux éléments « pères » l'uranium 235 et 238, de leurs descendants ainsi que du potassium 40. Ces éléments sont présents dans la partie interne de la planète Terre (le manteau) et la croûte terrestre (la lithosphère).

- l'**énergie des marées et des courants**, qui est une énergie engendrée par l'attraction périodique des masses d'eau des océans par le Soleil et la Lune, par la rotation de la Terre et les vents.

3) Énergies de stock, énergies de flux

3-1 ÉNERGIE DE STOCK

Dans la nature, les énergies primaires non renouvelables se présentent sous forme de mines, mines de charbon, de lignite, d'uranium... ou de **gisements**, gisements de pétrole, de gaz.

Ces énergies primaires sont dites **énergies de stock** car elles sont extraites en fonction des besoins de la consommation. Il est aisé de les stocker et d'adapter les quantités extraites à la demande. Leur production n'est pas soumise aux aléas du climat ou de la météorologie. Elles ne sont pas intermittentes mais peuvent en contrepartie subir d'autres contraintes, en particulier d'ordre géopolitique, propres à toutes les matières premières.

La possibilité de stocker l'énergie est importante. Le stockage permet d'éviter les déséquilibres entre production et consommation, des déséquilibres de nature à engendrer soit des pénuries soit des surproductions, toutes deux dommageables aux économies.

A titre d'exemple, les réservoirs souterrains de gaz permettent de stocker le gaz hors des périodes hivernales lorsque les cours sont bas pour déstocker le gaz en hiver lorsque les besoins de chauffage engendrent une forte consommation et que les cours s'envolent.

Dans un stockage, l'énergie est concentrée. Elle peut se présenter sous différentes formes :

- énergie chimique (stocks de carburant, charbon, pétrole, gaz, bois, biomasse...)
- énergie potentielle (barrage, lac de retenue...)
- énergie nucléaire (matière fissile, uranium)

3-2 ÉNERGIE DE FLUX

La plupart des énergies renouvelables trouvent leur origine dans des phénomènes qui se manifestent de manière plus ou moins continue, aléatoire ou périodique. Elles sont dites énergies de flux, sous-entendu soumises à l'intensité du flux énergétique qui les crée (intensité et durée du rayonnement solaire, vitesse du vent, débit d'un fleuve, hauteur des marées...).

Un exemple d'énergie de flux est donné par l'énergie éolienne qui utilise l'énergie cinétique des masses d'air animées par la circulation atmosphérique (dont le moteur est le Soleil). Il en est de même de l'énergie solaire photovoltaïque, sa production dépend à chaque instant de l'ensoleillement, lui-même fonction de la nébulosité, de la saison et de l'alternance du jour et de la nuit.

D'autres sources d'énergie ont un statut intermédiaire, un panaché entre une énergie de flux et une énergie de stock, par exemple le solaire thermique. Il permet de stocker temporairement de la chaleur à l'échelle de la journée, la chaleur accumulée pendant le jour est restituée pendant la nuit.

L'énergie hydraulique, est également un panaché entre une énergie purement de flux (centrales dites au fil de l'eau, leur production étant fonction du seul débit du fleuve) et une énergie de stock (centrales hydrauliques de barrage où l'eau est stockée dans des retenues amont avant d'être turbinée en fonction de la demande). La biomasse peut tantôt être classée comme étant une énergie de flux si l'on considère le rythme annuel et saisonnier des cultures, tantôt comme une énergie de stock si l'on considère l'exploitation forestière, le renouvellement du bois s'effectuant à l'échelle de la décennie ou du demi-siècle.

Par rapport aux énergies de stock, les énergies de flux sont le plus souvent des **énergies diffuses**, (solaire, éolienne, agro carburants...) dites de faible intensité lorsqu'on considère leur production par rapport aux surfaces qu'elles mobilisent. Rationnellement et économiquement, ces énergies diffuses non centralisées devraient être préférentiellement « consommées » sur place ou à proximité de leur lieu de production. Ce n'est pas toujours l'orientation retenue.

Pour conclure cette courte introduction sur les énergies de flux, leur développement à grande échelle nécessitera que d'importants progrès soient réalisés en matière de stockage de l'énergie afin de pouvoir faire face au caractère intermittent de leur production.

4) Les transformations (conversions) des énergies primaires, les rendements

A partir des énergies primaires, les conversions énergétiques ont pour but de produire une énergie utilisable par un consommateur final.

Elles consistent, par exemple, en partant du vent, du gaz, de l'hydraulique, de l'uranium ou du charbon, à produire l'électricité alimentant en 220 volts une prise électrique chez un consommateur

4-1 LES VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

Atteindre un tel objectif nécessite très généralement de passer par plusieurs stades intermédiaires, par des **énergies secondaires** nommés **vecteurs énergétiques**.

Les vecteurs énergétiques permettant ce passage d'une énergie primaire à une énergie directement utilisable sont essentiellement :

- les **produits pétroliers** raffinés utilisés in-fine dans les moteurs à explosion, les chaudières, les fours...

- l'**électricité** d'origine thermique, hydraulique, éolienne, photovoltaïque ou nucléaire...

- la **vapeur** produite par des chaudières centralisées et distribuée par des réseaux (chauffage urbain...),

- divers autres vecteurs énergétiques, anciens ou nouveaux en cours de développement, par exemple l'**hydrogène** pour l'alimentation des piles à combustibles... etc.

4-2 LE RENDEMENT DES CONVERSIONS

Lors de la conversion d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie, on constate que les procédés qui permettent cette conversion « consomment » eux-mêmes de l'énergie. Il en résulte inévitablement que la quantité d'énergie finalement obtenue après conversion est inférieure à la quantité d'énergie primaire initiale.

La différence entre l'énergie primaire initiale et l'énergie finale a été dépensée pour assurer le fonctionnement des processus de conversion, dépensée du fait de l'imperfection des procédés utilisés (pertes calorifiques, frottements...). C'est également l'énergie dépensée au cours de la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique, cette dernière conversion ayant toujours un rendement limité.



Pour en savoir plus Le rendement de Carnot

Le rapport entre la quantité d'énergie convertie et la quantité d'énergie initiale est appelé le **rendement de la conversion**. Dans tous les cas il est inférieur à 1 (ou à 100%).

Prenons l'exemple du gaz naturel et sa conversion depuis sa captation à la sortie du puits jusqu'à sa livraison au consommateur final. Entre les deux, il a subi plusieurs traitements : extraction du gaz carbonique, désulfuration pour éviter la corrosion des tuyauteries de transport puis plusieurs compressions le long du gazoduc de transport, éventuellement une liquéfaction suivie d'une vaporisation si son transport s'effectue par méthanier.

Le gaz sera ensuite compressé pour être injecté dans un réservoir de stockage souterrain d'où il sera ultérieurement soutiré en fonction des besoins. Le gaz sera enfin prêt à être injecté dans les réseaux de distribution et acheminé vers les consommateurs.

Toutes ces opérations de désulfuration, de compression et de détente successives, de liquéfaction puis de vaporisation sont elles-mêmes consommatrices d'énergie.

5) Énergie finale et énergie utile

Après conversion, les énergies primaires sont commercialisées et utilisées sous diverses formes par les utilisateurs finals, les industriels, le secteur des services, les particuliers... etc.

Parmi les principales formes d'utilisation finale de l'énergie, citons :

- l'**énergie thermique** (la chaleur) pour le chauffage des locaux, des fours et des processus industriels (métallurgie, chimie, séchage...)

- l'**énergie cinétique** ou mécanique sous diverses formes liées au travail et aux mouvements. Les applications industrielles sont innombrables, la motorisation, l'automatisation, les transports, les applications domestiques, l'électroménager... etc.

- l'**énergie électromagnétique** des rayonnements (ondes) : les télécommunications, la radio, la télévision, l'éclairage...

L'**énergie finale** peut se définir comme étant l'énergie que le consommateur achète à un fournisseur d'énergie. C'est par exemple l'électricité en 220 ou en 380 volts que comptabilise un compteur individuel, le carburant acheté à la station-service...

L'**énergie utile** est celle qui rend effectivement le service attendu par l'utilisateur. Tout comme lors de la conversion de l'énergie primaire en énergie finale, le rapport entre l'énergie finale (celle qui est achetée) et l'énergie utile (celle qui rend le service attendu) est inférieur à 1 (inférieur à 100%).



Pour en savoir plus Énergie finale et énergie utile

Fort heureusement d'autres utilisations offrent de meilleurs rendements entre énergie finale et énergie utile. C'est en particulier le cas des moteurs électriques dont le rendement peut atteindre 95%, voire plus pour les gros moteurs.

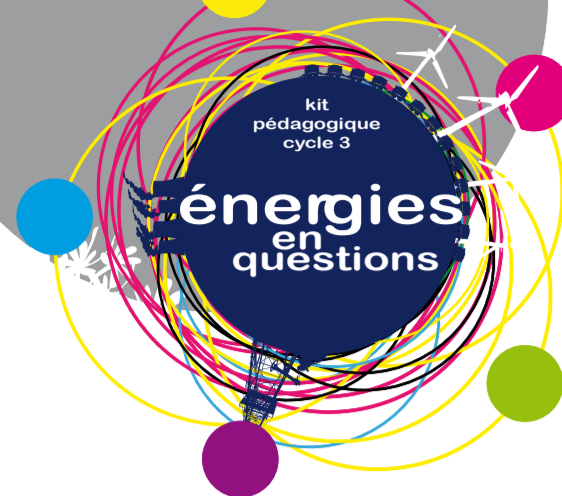
Il faut cependant nuancer ces derniers chiffres et souligner que le rendement d'une centrale électrique (énergie électrique produite par rapport à l'énergie primaire consommée) est de 0,42 à 0,45 pour les meilleures centrales thermiques classiques et en moyenne de 0,33 pour les centrales nucléaires à eau pressurisée car fonctionnant à des températures inférieures.



Énergie finale et énergie utile

L'exemple de l'automobile est très révélateur de l'écart pouvant exister entre énergie finale, celle que l'on « achète » et celle qui est réellement « utile » au consommateur. L'automobiliste qui achète son carburant achète de « l'énergie finale ». Un chimiste calcule facilement la quantité d'énergie que ce carburant est potentiellement capable de fournir par combustion. Hélas ! Seulement 40% (50% dans les excellents moteurs) de l'énergie potentiellement contenue dans le carburant se retrouve sous forme de travail sur les pistons (rendement de Carnot oblige !) ce qui signifie que 50 à 60% de l'énergie finale achetée s'est inutile-

ment dissipée sous forme de chaleur évacuée par le radiateur et par les gaz chauds sortant du pot d'échappement. A cette déperdition vient s'ajouter l'énergie consommée par l'aspiration de l'air dans les cylindres, par le refoulement des gaz d'échappement, par les frottements internes du moteur et par divers auxiliaires nécessaires à son fonctionnement (pompes à eau et d'injection...) etc... Finalement ce n'est que 15% de l'énergie finale, celle potentiellement contenue dans le carburant acheté à la pompe, qui est utilisée au niveau des roues pour propulser la voiture !



Pour ceux qui ne sont pas familiers avec les problèmes énergétiques, il peut paraître surprenant, voire choquant, de constater que le rendement global de la conversion d'une énergie primaire en énergie finale est généralement faible. La « faiblesse » du rendement provient du fait que souvent, à un certain stade de la conversion, il faut consentir à transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique avec un rendement inévitablement limité (voir ci-contre le en savoir plus relatif au rendement du cycle de Carnot)

Pour conclure, la grande révolution énergétique passera prioritairement par la recherche d'un meilleur rendement des divers systèmes énergétiques, en d'autres termes, par la recherche de l'**efficacité énergétique** des différents procédés de conversion des énergies primaires.

Augmenter l'efficacité énergétique seule n'est cependant pas suffisant. La démarche doit être complétée par d'autres considérations et des actions ayant pour objectif la diminution de la consommation d'énergie, la diminution de l'impact environnemental de la production d'énergie (rejet de gaz à effet de serre, déchets ultimes, pollutions diverses, consommation d'eau...etc.).

Ainsi que le montrent les bilans dressés pour l'année 2003, il existe une différence notable entre le total des énergies primaires produites au niveau mondial (10 709 Mtep, figure 3) et le total des énergies consommées par les utilisateurs finals (7 070 Mtep, figure 4). Une grande partie de la différence (3 639 Mtep) correspond à la consommation d'énergie primaire du secteur énergétique (extraction, conversion, transport et transformations diverses)

+ Pour en savoir plus **L'OCDE, pays membres, agences rattachées et élargissements prévisibles**

La figure 3 dresse le bilan mondial des productions des différentes énergies primaires et la figure 4 le bilan mondial de la consommation finale d'énergie. Dans ces deux tableaux sont volontairement présentés de manière distincte l'ensemble du Monde, les pays de l'OCDE* et les pays qui ne font pas partie de l'OCDE (Non-OCDE).

6-2 BILAN DE LA PRODUCTION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE

Pour l'année 2003, la production mondiale totale d'énergie primaire, figure 3, a été de 10 709 millions de tonnes équivalent pétrole dont seulement 3 802 Mtep (soit 35,6%) ont été produites dans les pays de l'OCDE et 6 907 Mtep (soit 64,4%) produites hors de l'OCDE. Première remarque : ce ne sont pas les pays les plus riches de la planète et les plus gros consommateurs qui disposent de la majorité des ressources énergétiques.

On constate par ailleurs une différence de structure de la production des différentes énergies primaires selon les régions. Le pétrole brut est majoritairement produit dans les pays n'appartenant pas à l'OCDE tandis que la production de charbon est répartie entre les pays de l'OCDE et les pays Non-OCDE.

Quant au nucléaire il est essentiellement utilisé dans les pays de l'OCDE tandis que la production de combustibles renouvelables (biomasse) y est quasiment inexistante.

3 Bilan mondial des productions d'énergies primaires en Mtep (éd. IEA 2003)

Durant les trente dernières années la production des énergies primaires a eu un taux de croissance moyen de 1,7%. Par contre depuis le début du XXIème siècle (avant la crise de 2008) on a constaté une accélération de la demande en gaz et une explosion de la production mondiale de charbon, plus particulièrement en Chine avec, dans ce pays, un taux de croissance record de + 19,3% en une année entre 2002 et 2003 !

5 La vue de nuit de notre planète illustre les écarts considérables de consommation d'énergie (ici la consommation consacrée à l'éclairage)

6-3 LE BILAN MONDIAL DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE FINALE

Secteur	Monde	OCDE	non-OCDE	Amérique du Nord	Afrique
Mtep	7070	3622	3448	1788	411
Industrie	33%	31%	35%	27%	20%
Transport	27%	35%	18%	41%	15%
Résidentiel	40%	34%	47%	32%	65%
Energie					
Charbon	7,5%	3,5%	11,5%	2%	4,5%
Prod. pétroliers	41%	51%	30,5%	51,5%	24%
Gaz	17%	20,5%	13%	23%	5%
Comb. renouv.	14,5%	3,5%	26%	3%	58,5%
Électricité	16,5%	20%	13%	20%	8%
Chaleur	3,5%	1,5%	6%	0,5%	0%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

4 Consommation en Mtep d'énergie finale dans le monde, hors usage énergétiques (AIE 2003)

La figure 4 présente :

a) **En partie haute** (exprimée en Mtep) le total de l'énergie finale consommée dans le monde (7 070 Mtep) et consommée dans les pays de l'OCDE (3622), les pays hors OCDE (3448). De plus, pour bien marquer les disparités entre les continents, on distingue l'Afrique de l'Amérique du Nord.

On remarquera que les pays de l'OCDE consomment à eux seuls la moitié de l'énergie finale 3 622 Mtep alors qu'ils ne produisent que le tiers de l'énergie primaire.

Toujours en partie haute du tableau, est indiquée en % la consommation finale d'énergie selon les trois grands secteurs de la consommation que sont l'Industrie (33%), le transport (27%), et le secteur tertiaire-résidentiel (40%).

b) **En partie basse (Energie)**, le tableau indique en %, (charbon, produits pétroliers, gaz, combustibles renouvelables, et les vecteurs que sont les produits de conversion l'électricité et la chaleur) l'origine de chaque énergie finale.

En conclusion, beaucoup plus parlante et explicite que les chiffres et les bilans présentés précédemment, la figure 5 est une vue de la Terre prise de nuit prise par satellite. Elle illustre la disparité des consommations d'énergie entre les différentes régions du monde, les grandes concentrations (USA, Europe, Japon, Sud-Est asiatique) et ses zones obscures, (dont l'Afrique).

6-4 LES GRANDS POSTES DE CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

Au niveau mondial, ils se répartissent ainsi :
 - La production d'électricité et l'industrie consomment 76% de la production de charbon,
 - les transports consomment 58% des produits pétroliers, l'industrie en consomme 20%
 - l'industrie consomme 42% du gaz, le résidentiel en consomme 34%
 - L'industrie consomme 42% de l'électricité, le résidentiel 29%, le tertiaire 23%.

6-5 CONSOMMATION D'ÉNERGIES PRIMAIRES ET FINALES EN FRANCE (2004)

Pour la France, les consommations d'énergie primaire (a) et la consommation d'énergie finale (c) exprimées en Mtep sont données dans le tableau ci-dessous :
 - la consommation de la branche énergie (b), correspond à l'énergie nécessaire à la transformation de l'énergie primaire (a) en énergie finale (c),
 - la consommation non énergétique (d) correspond aux ressources utilisées en tant que matière première (pétrochimie, lubrifiants, plastiques...)
 La consommation d'énergie primaire (a) est la somme (b+c+d).

La consommation est donnée par type d'énergie primaire, charbon, pétrole, gaz, électricité, renouvelable.

Consommation en France (en Mtep)

Type	branche énergie (b)		non énergétique (d)	
	(a)	(b)	(c)	(d)
Charbon	13,13	6,68	6,31	0,14
Pétrole	92,80	6,34	73,22	13,24
Gaz	40,32	2,94	35,20	2,18
Elec.	117,27	81,17	36,10	
Renouv.	12,66		10,39	
Total	276,18	99,40	161,22	15,56

Quelques commentaires :

a) Production française d'énergie primaire

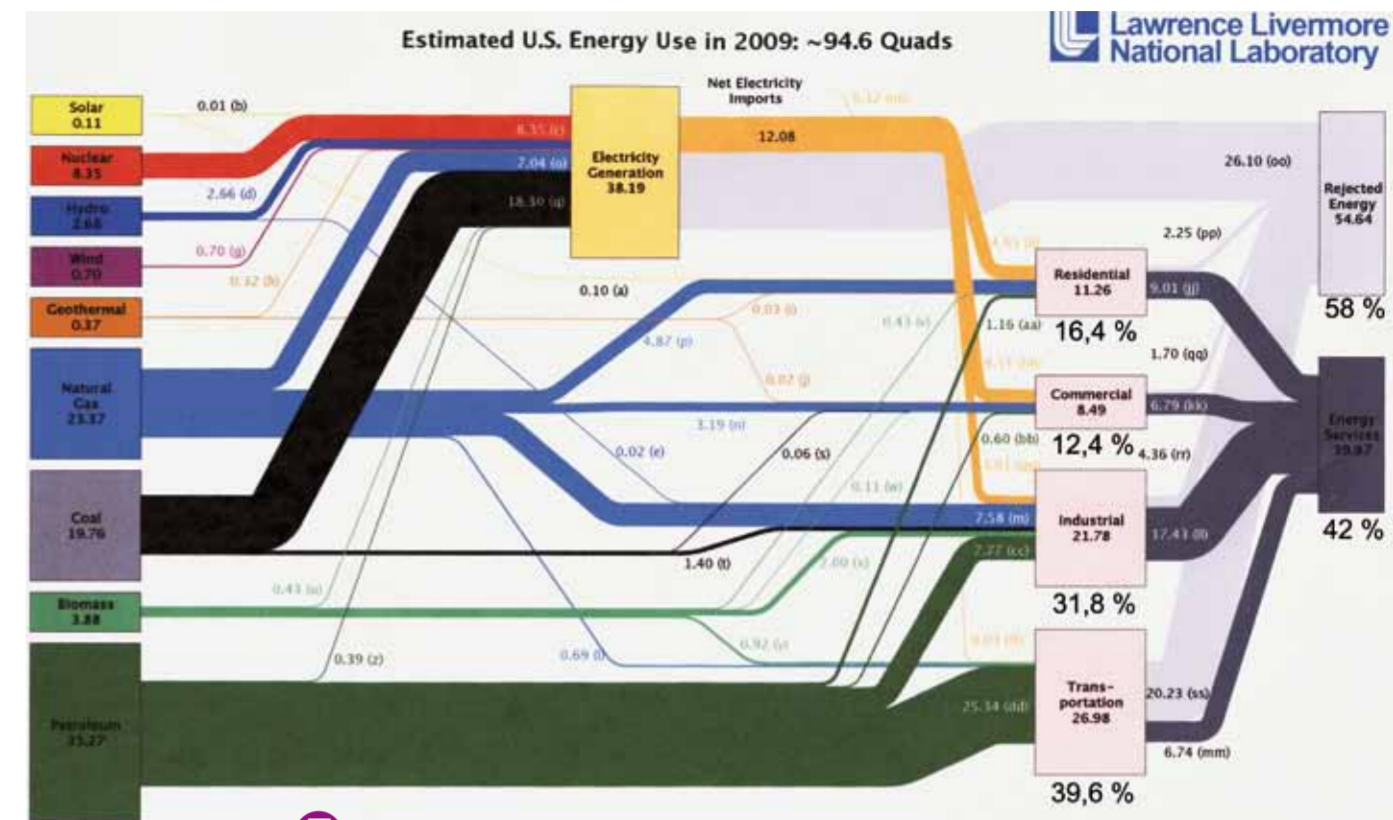
Cette production nationale est de 138,10 Mtep soit seulement 50,10% de l'énergie primaire consommée. Cette énergie primaire est fournie à 88,7% par la production d'électricité, électricité d'origine nucléaire (84,6%) et hydraulique (4,1%).

La production nationale de pétrole est de 1,14 Mtep, celle de gaz de 1,12 Mtep et celle de charbon de 0,39 Mtep. L'ensemble représente moins de 2% de la consommation nationale d'énergie primaire.

Hors électricité hydraulique, les énergies renouvelables, (biomasse, éolien et solaire) représentent 9,1% de la production nationale.

b) Les importations et exportations d'énergie primaire

Hors uranium, les importations d'énergie primaire sont de 167,28 Mtep.



7 Le système énergétique des USA, bilan 2009

Elles se répartissent entre 13,13 Mtep de charbon (7,5%), 114,8 Mtep de pétrole (68,6%), 38,79 Mtep de gaz (23,21%) et 0,56 Mtep d'électricité (0,3%) pour un montant de 60 milliards d'€. Les exportations d'énergie primaire représentent 28,27 Mtep dont 21,31 Mtep de pétrole raffiné et 5,9 Mtep d'électricité.

Compte tenu des stocks et des produits en circulation sur les mers, la France importe l'équivalent de 137,22 Mtep d'énergie primaire, soit 49,9% de ses besoins.

Notons que les importations françaises d'uranium (Canada, Australie, Niger...) ne figurent pas dans ce bilan. Elles correspondent en moyenne à 8 000 tonnes d'uranium naturel par an pour un montant inférieur au milliard d'€.

6 Consommation d'énergie primaire en France en Mtep. Taux d'indépendance de chaque énergie primaire

7) Quelques notions sur la maîtrise des énergies

L'utilisation rationnelle de l'énergie repose sur trois notions distinctes qui doivent être dissociées. Ce sont l'efficacité, la sobriété et l'intensité énergétiques.

L'efficacité énergétique. Pour un service donné, elle exprime le rapport existant entre la production d'une certaine quantité d'un bien ou d'un service (par exemple une quantité d'objets fabriqués, des kilomètres parcourus, ...) et la quantité d'énergie qu'il faut dépenser pour produire cette quantité d'objets ou de services. Comment augmenter cette efficacité ? Deux exemples extraits de la vie quotidienne explicitent la notion d'efficacité énergétique.

Le premier exemple concerne l'utilisation des lampes dites « basse consommation ».

Pour une consommation de 20 Wh ces lampes (une fois chaudes !) fournissent le même éclairage, le même service, qu'une lampe à incandescence consommant 100 Wh. Le second concerne le co-voiturage pour emmener quatre enfants à l'école. Un seul trajet en covoiturage avec le « ramassage » des quatre enfants fournit le même service que quatre voitures effectuant un trajet équivalent. On améliore l'efficacité énergétique par des progrès technologiques (lampes basse consommation...) ou par une meilleure gestion des moyens dont on dispose (covoiturage...).

La sobriété énergétique consiste à supprimer les consommations inutiles ou les surconsommations du type démarrage sur les « chapeaux de roues » ou chauffage excessif des locaux. La sobriété dépend du comportement du consommateur et de l'attention qu'il porte au gaspillage de l'énergie.

L'intensité énergétique est une notion globale qui revêt un caractère plus économique. Elle exprime le rapport entre la consommation d'énergie primaire et un indicateur économique mesurant la production d'un pays, d'un secteur industriel ou d'une branche d'activité. Pour un pays, bien qu'il soit contesté, l'indicateur retenu est le PIB (Produit Intérieur Brut ou valeur de la production des biens et des services produits). L'intensité énergétique se détermine au niveau d'un pays, d'un secteur industriel ou d'une branche d'activité. Sa décroissance est le résultat d'une volonté partagée entre l'Etat, les entreprises et les particuliers acheteurs et utilisateurs de ces biens et services.

Sans entrer dans le débat du choix de tel ou tel indicateur économique, il est possible d'explicitement cette notion d'intensité énergétique au travers de quelques méthodes permettant de la diminuer, c'est-à-dire de produire un bien ou un service en consommant moins d'énergie primaire.

+ Pour en savoir plus **L'intensité énergétique**

La figure 7 est celle du système énergétique des États Unis d'Amérique, il montre toute la complexité de ce système, les différentes énergies primaires, leur utilisation et le rendement global de chacune d'elle. La colonne de gauche regroupe l'ensemble des sources d'énergie primaire, pétrole, biomasse, charbon, gaz, nucléaire et énergies renouvelables (hydraulique, géothermie, éolien et solaire). Après transformation les rendant commercialisables et utilisables, ces énergies primaires sont consommées par les différents secteurs (figurés en rose), le résidentiel, le commerce, le tertiaire, l'industrie et les transports. Une partie des énergies primaires (charbon, gaz, nucléaire et renouvelables) sert à la production de l'électricité qui est par la suite consommée par les quatre secteurs précédents.

Dans la colonne de droite, l'encadré en gris foncé correspond l'énergie qui est réellement utile, le gris clair correspond à l'énergie perdue du fait des rendements des installations, des appareils ou des véhicules. Les indications du schéma (exprimées en unités bizarres, en Quads, en quadrillions de British thermal Unit !) montrent que le rendement des moyens de transport est de 25%, celui de la conversion de l'énergie primaire en électricité est de 31,6%. On remarque le bon rendement énergétique du secteur industriel 80%. Globalement le rendement du système énergétique des USA (énergie utile en gris foncé colonne de droite divisé par le total des énergies primaires consommées, colonne de gauche) est de 42 %, ce qui signifie aussi que 58% de l'énergie primaire sont perdus in-fine sous forme de chaleur, dissipée dans l'environnement (gris clair en haut colonne de droite).

Converti en « tonnes équivalent pétrole », en tep, le total des énergies primaires consommées aux USA (94,6 Quads) est 2,38 milliards de tep (1 tep = 3,98 10⁷ Btu).

+ Le système énergétique des USA, bilan 2009

L'OCDE, pays membres, agences rattachées et élargissements prévisibles

+ Pays : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Chili (2010), Corée du Sud, Danemark, Espagne, Estonie (en 2010), États Unis, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Israël (en 2010), Italie, Luxembourg, Mexique, Nouvelle Zélande, Pays-Bas, République Tchèque, Royaume Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie. Ces pays représentent 80% du PNB (Produit National Brut) mondial correspondant à la production finale de biens et de services. Agences rattachées : l'Agence Internationale de l'énergie (AIE), l'Agence de l'Énergie Nucléaire (AEN). Les élargissements envisagés à terme : l'Afrique du Sud, la République de Chine, l'Inde et le Brésil.

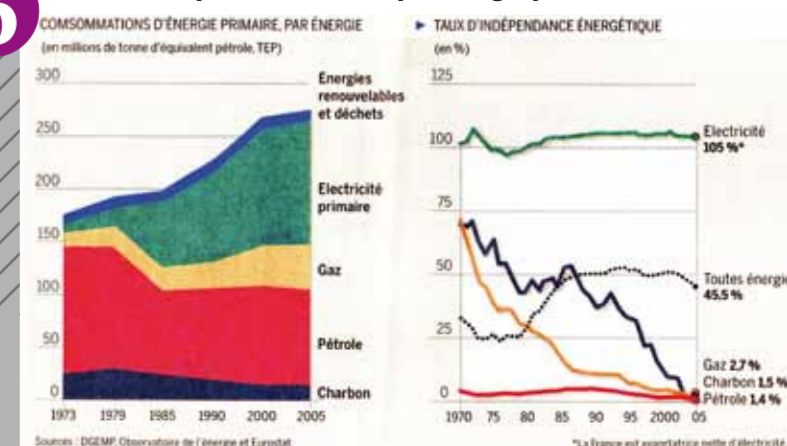
3 Bilan mondial des productions d'énergies primaires en Mtep (éd. IEA 2003)

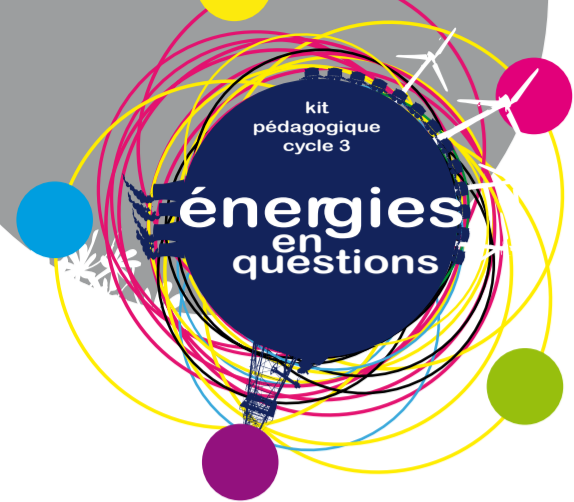
Sources d'énergies primaires	Monde		OCDE		Non-OCDE	
	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%
Charbon	2 562	23,9	957	25,2	1 605	23,2
Pétrole brut	3 783	35,3	1 019	26,8	2 764	40,0
Gaz naturel	2 250	21,0	925	24,3	1 325	19,2
Nucléaire	688	6,4	580	15,3	108	1,6
Hydroélectricité	228	2,1	107	2,8	121	1,7
Géothermie, etc.	54	0,5	3	0,9	18	0,3
Comb. renouvelables	1 144	10,7	178	4,7	966	14,0
TOTAL	10 709	100	3 802	100	6 907	100

5 La vue de nuit de notre planète illustre les écarts considérables de consommation d'énergie (ici la consommation consacrée à l'éclairage)



6 Consommation d'énergie primaire en France en Mtep. Taux d'indépendance de chaque énergie primaire





La biomasse

1) Quelques définitions et quelques caractéristiques de la biomasse

Définitions : la biomasse, la photosynthèse

La « **biomasse** » est l'ensemble des organismes vivants terrestres et marins constituant le monde végétal, le monde animal et les micro-organismes. D'un point de vue énergétique nous nous intéresserons qu'à la biomasse végétale. L'énergie nécessaire à la constitution et au développement de la biomasse végétale est directement fournie par le rayonnement solaire arrivant au niveau du sol sous forme lumineuse.

La « **photosynthèse** » est le processus par lequel se forme et se développe le monde végétal. Ce processus est extrêmement complexe, il est sommairement présenté à la fin de ce chapitre. Pour synthétiser les éléments nécessaires à la formation des plantes, la photosynthèse utilise la lumière comme source d'énergie, le gaz carbonique de l'atmosphère et l'eau contenue dans les cellules des plantes comme éléments de base. Les sols fournissent les autres matériaux nécessaires à la formation de la biomasse, dont les minéraux.

2) Le potentiel mondial

La masse totale de la biomasse de la planète est estimée à 2 000 milliards de tonnes réparties entre les continents et les océans, respectivement, 1 800 et 200 milliards de tonnes. Les forêts représentent à elles seules 1 600 milliards de tonnes. Ce potentiel n'est pas utilisable tel quel et sans contrainte. Une utilisation soutenable de ce stock de biomasse continentale nécessite à minima de préserver son renouvellement et sa diversité. On évalue la capacité annuelle de renouvellement de la biomasse à 400 milliards de tonnes (humidité de la biomasse comprise) ce qui représente 120 milliards tonnes de matières sèches, soit en termes d'énergie l'équivalent de 71 milliards de tonnes équivalent pétrole (tep).

Sur ce fabuleux potentiel, l'Homme ne prélève actuellement que très peu, seulement 3,8 milliards de tonnes par an :

- 2,1 milliards de tonnes pour l'alimentation, dont un quart sous forme de céréales et trois quarts pour l'alimentation animale,
- 1,3 milliards de tonnes pour l'énergie et le chauffage, essentiellement par combustion,
- 0,4 milliard de tonnes sous forme de matériaux, construction, mobilier, papier, chimie...

A l'échelle planétaire l'énergie qu'il serait possible de produire à partir de la matière organique générée par la photosynthèse est gigantesque. Elle est équivalente à huit fois la consommation d'énergie de l'humanité. Pour former cette biomasse, les organismes photosynthétiques assimilent chaque année environ 100 milliards de tonnes de carbone... et une quantité d'eau encore beaucoup plus importante ! Une multitude de paramètres peuvent limiter la quantité de biomasse terrestre capable de se renouveler annuellement par photosynthèse : les surfaces exploitables disponibles, la qualité des

sols, les ressources en eau, l'ensoleillement, les températures et l'amplitude de leurs variations saisonnières... etc.

On exprime la productivité de la biomasse, hors humidité, en tonnes de matières sèches récoltées par hectare et par an (tMS/ha/an). Une productivité de 30 tMS/ha/an correspond à une excellente productivité. A titre d'exemple, la moyenne de la productivité de la forêt française est un peu inférieure à 6 tMS/ha/an ce qui correspond à 2,5 tonnes équivalent pétrole/hectare/an.

3) Le potentiel de développement de la biomasse

A l'horizon 2050, un scénario présenté par les Nations Unies envisage de tripler les prélèvements de biomasse pour la nourriture et de les quadrupler pour l'obtention de matériaux pour la construction, de matière première pour la chimie et les agrocarburants... Ces besoins représenteraient alors 13% du potentiel de renouvellement, ils resteraient toujours en dessous de la limite de ce qui est raisonnable de prélever à la condition que ces 13% soient correctement répartis. Cette projection montre que le développement des usages de la biomasse, tout en restant dans le cadre d'une exploitation pérenne, n'est pas limité par la ressource naturelle. Cependant un usage intensif de la biomasse peut être limité régionalement par d'autres considérations et contraintes dont les deux principales sont :

- la compétition entre les usages alimentaires et les usages non alimentaires, cette compétition ne doit se faire ni au détriment des premiers (pénurie des denrées, spéculation, envolée des cours) ni du foncier, tout particulièrement dans les régions à très forte densité démographique.
- l'exploitation de la biomasse ne doit pas conduire à surexploiter les sols par une culture intensive (appauvrissement, érosion...). Elle doit préserver les réserves d'eau douce, ne pas conduire à une déforestation sauvage et préserver une certaine biodiversité.

Cas de la France

La France dispose d'un fort potentiel de production de biomasse du fait de la qualité de ses sols et des conditions climatiques favorables (climat tempéré et bonne pluviométrie).

En France métropolitaine, les surfaces agricoles et forestières couvrent 470 000 km², soit 85% des 550 000 km² du territoire. La forêt et les cultures annuelles occupent chacune 27% du territoire (soit 15 millions d'hectares chacune). L'évolution que l'on constate depuis un demi-siècle est une diminution des surfaces cultivées, une augmentation des surfaces boisées et une augmentation régulière des surfaces dédiées à l'urbanisation, ces dernières augmentant de 60 000 hectares par an.

4) Les différents modes d'exploitation de la biomasse à des fins énergétiques

Ce sont essentiellement la combustion directe et la combustion après transformation préalable par méthanisation ou par fermentation alcoolique ou thermochimique (gazéification).

Contrairement à celle des hydrocarbures, la combustion de la biomasse (ou d'un agrocarburant) ne devrait en principe ajouter aucune quantité supplémentaire de gaz carbonique dans l'atmosphère puisque le CO₂ émis par la combustion de la biomasse n'est jamais qu'un retour à l'atmosphère du CO₂ mobilisé lors de sa formation. Le retour s'effectue lors de la décomposition de la biomasse morte après plusieurs années (pour la biomasse annuelle), ou plusieurs décennies (pour les matières ligneuses, le bois...).

Cette constatation doit cependant être nuancée car certaines transformations de la biomasse sont consommatrices de produits pétroliers (opérations d'abattage, de transport, de gazéification et de transformations diverses...). Chaque mode de production et d'utilisation de la biomasse doit être examiné à la lumière des considérations précédentes : partage socialement acceptable avec les besoins alimentaires, gestion raisonnable de la ressource des sols et de l'eau, biodiversité, comptabilisation de la consommation énergétique propre à chaque filière.

4-1 LA COMBUSTION DIRECTE DE LA BIOMASSE

La **combustion directe** est actuellement l'utilisation la plus répandue.

La combustion traditionnelle dans un foyer ouvert à tirage naturel produit de la chaleur mais, compte tenu de l'hygrométrie de la biomasse et de la présence prépondérante d'azote froid composant à 80% des fumées, la combustion s'effectue à des températures relativement basses, 700°C étant un maximum.

Le rendement de la combustion est donc assez faible, de plus la présence dans les fumées d'acides et de goudrons condensables est à l'origine de phénomènes de corrosion et de pollution.

Les émissions de poussières et de gaz nocifs (monoxyde de carbone, goudrons...) ne peuvent être éliminées que par des installations de chauffage plus sophistiquées, à tirage forcé, fonctionnant à des températures plus élevées.

Le rendement de la combustion du bois ou des sous-produits d'exploitation du bois (écorce, sciure, ...) varie dans de très larges proportions, de 2 à 5% pour les foyers ouverts traditionnels, jusqu'à 85 %, voire 90 %, pour des chaudières modernes à tirage forcé où la combustion s'effectue à des températures plus élevées (850 à 950 °C).

Il faut brûler 2,2 tonnes de bois sec pour produire la même énergie que la combustion d'une tonne de pétrole, 1 tep étant l'équivalent de 11,6 MWh (mégawattheure).

La filière du chauffage au bois en France

En 2008 la France était équipée d'un parc d'un millier de chaufferies de taille industrielle (dont 600 collectives) représentant au total une puissance installée de 2 500 MW. Certaines installations dites de cogénération produisent simultanément de la chaleur et de l'électricité.

Dans une installation de grande taille (à haut rendement), 4 m³ de bois sont équivalents à 1 tonne de pétrole et évitent le rejet de 2,5 t de

CO₂ d'origine fossile. Les performances des petites installations sont plus modestes, toujours pour 4 m³ de bois elles permettent d'éviter 1,5 t de CO₂ fossile.

Comme expliqué précédemment, dans ces installations, le CO₂ émis par la combustion directe de la biomasse ne participe pratiquement pas à l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère.

4-2 LES BIOGAZ OBTENUS PAR MÉTHANISATION DIRECTE

Les biogaz sont obtenus par un processus naturel de dégradation par fermentation anaérobie (en absence d'oxygène) des matières organiques mortes, végétales ou animales. Ces matières organiques proviennent des déchets et résidus de l'industrie agroalimentaire, des ordures ménagères non recyclables, des boues des stations d'épuration des eaux...etc.

La méthanisation s'effectue en plusieurs phases, chacune correspondant à une activité microbienne spécifique. Au cours de la première phase, les grosses molécules organiques sont tout d'abord décomposées en éléments plus simples et solubles (par exemple la cellulose est transformée en sucres solubles). Dans les phases ultérieures, toujours par fermentation et à l'aide d'autres micro-organismes, le « jus » formé lors de cette première phase est transformé en alcools et en divers acides puis, au cours de la phase finale, en méthane.

Il n'y a pas un biogaz unique mais des biogaz. La composition d'un biogaz est essentiellement fonction de la nature des éléments soumis à la décomposition. Tous les biogaz sont constitués, en proportions variables, d'un mélange de méthane, de vapeur d'eau, d'hydrogène sulfuré et de dioxyde de carbone. En France, la transformation des déchets par méthanisation pourrait prochainement atteindre un potentiel de 1 million de tep.

Pour les raisons évoquées ci-après, la méthanisation n'est pas la solution miracle qui permettrait de résoudre le problème posé par l'énorme quantité des déchets urbains et ménagers produite chaque année en France, soit 45 millions de tonnes.

Les réactions mises en jeu par la méthanisation sont lentes mais surtout elles sont incomplètes. Seulement 15 à 20 % de la matière initiale est transformée en biogaz et le résidu doit être éliminé. L'épandage étant devenu écologiquement et politiquement inacceptable, restent l'incinération ou le stockage en décharge pour éliminer le résidu... solutions toutes deux également contestées.

La méthanisation par fermentation anaérobie permet d'obtenir un mélange gazeux contenant de 50 à 60% de méthane, de 35 à 40% de CO₂, de l'humidité et des composés soufrés. La présence simultanée d'hydrogène sulfuré, un gaz très toxique (le « plomb des vidangeurs »), d'eau et de CO₂ rend ces gaz corrosifs et leur transport difficile et coûteux.

Le pouvoir calorifique de ces gaz restant modeste, ils ne sont guère économiquement utilisables qu'immédiatement et par combustion directe sur le site même de leur production. La méthanisation s'applique à d'autres déchets que les déchets ménagers, en particulier aux boues en provenance des stations d'épuration

des eaux urbaines, industrielles ou agricoles.

4-3 LES AGROCARBURANTS (INITIALEMENT DÉNOMMÉS BIOCARBURANTS)

La directive de l'Union européenne de 2003 définit les biocarburants comme étant « un combustible liquide ou gazeux produit à partir de biomasse et utilisé pour le transport ».

Après une période d'engouement, les biocarburants (tout au moins tels qu'ils sont actuellement produits) font aujourd'hui l'objet de vifs débats, notamment après les « révoltes de la faim » qui eurent lieu en 2008 au Mexique et en Egypte. C'est ainsi qu'en France on a abandonné l'appellation de **biocarburant** au profit d'**agrocarburant**, afin de bien différencier l'agriculture intensive actuellement à la base de la production de ces carburants, de l'agriculture biologique dont les méthodes sont notablement différentes. Les mots changent, quant à la réalité...

Historiquement, avant l'emploi de l'essence et du gasoil, les biocarburants ont été utilisés dès l'origine de l'automobile dans les moteurs à explosion. Les premiers moteurs construits par Nikolaus Otto 1832-1891 (qui avait un nom vraiment prédestiné !) utilisaient l'éthanol d'origine végétale comme carburant, tout comme la célèbre Ford T construite aux USA entre 1908 et 1927.

Quant à Rudolf Diesel (1858-1913), l'inventeur du moteur portant son nom, il faisait fonctionner ses moteurs à l'huile d'arachide.

Historiquement rappelons également que pendant la seconde Guerre mondiale la filière bois fut utilisée en France pour alimenter les moteurs des véhicules automobiles. Le « carburant » était généré sous forme gazeuse par des « gazogènes » embarqués sur les véhicules (essentiellement des camions compte tenu de leur poids). Durant cette guerre, la transformation du bois en carburant liquide par le procédé Fischer-Tropsch permit à l'Allemagne d'alimenter son armée malgré le blocus imposé par les alliés. Ce procédé est toujours utilisé pour la fabrication des carburants de synthèse.

4-3-1 Les agrocarburants de première génération

Les agrocarburants de première génération sont obtenus à partir de productions agricoles à vocation alimentaire utilisant des terres à haute valeur. En France on les produit à partir de la betterave à sucre (figure 2), du blé, du maïs, du tournesol, ou du colza. Aux USA à partir de soja et dans les pays équatoriaux à partir de la canne à sucre et du palmier à huile.

Dans les pays les plus dmunis la production d'agrocarburants de première génération entre directement en concurrence avec les besoins de l'alimentation locale, par exemple le maïs au Mexique.

1 Désolé je suis en train de sauver la planète

La première génération d'agrocarburants comporte deux filières, celle de l'éthanol et celle des huiles. **L'éthanol** (ou alcool éthylique de formule chimique CH₃-CH₂OH) est obtenu par la fermentation des glucides (des sucres).

Les cultures peuvent cependant se révéler intéressantes dans des pays en développement au climat aride.

Le traitement des huiles

L'obtention des huiles à partir des graines commence par une étape de broyage (trituration) suivi d'une extraction de l'huile par pressage et d'une purification finale. Les sous-produits sont des tourteaux destinés à l'alimentation animale. La France consomme plus de 5 millions de tonnes de tourteaux de soja... principalement importés des USA.

L'éthanol est obtenu par la fermentation des sucres.

a) Les sucres. Les sucres les plus simples sont les fructoses et les glucoses (voir annexe 1) Les sucres plus complexes sont formés à partir de ces deux monomères, le saccharose formé par l'union des deux monomères (fructose et glucose) et l'amidon, gros polymère formé de 30 à 30 000 molécules assemblées dont les liaisons chimiques peuvent être rompues. Le saccharose se trouve dans la canne à sucre et la betterave à sucre, il est directement transformé en éthanol par une fermentation utilisant des levures. L'amidon, est un sucre « lent » présent dans les grains des céréales blé, maïs, riz et dans la pomme de terre. Avant fermentation, l'amidon doit être décomposé (hydrolysé) en sucres plus simples sous l'action d'enzymes (telles les amylases présentes dans la salive et le pancréas) de champignons ou, dans l'industrie, de bactéries spécifiques.

b) La fermentation. Elle se fait en l'absence d'oxygène par des levures qui utilisent une partie de l'énergie chimique contenue dans les sucres. La fermentation s'accompagne d'un important dégagement de CO₂. Elle aboutit à un mélange complexe composé d'eau, d'éthanol dont la teneur est limitée à 18% et de divers sous-produits. Il est à noter que la fermentation s'arrête d'elle-même lorsque le degré d'alcool atteint 18%. L'éthanol quasi pur est par la suite extrait par distillation de ce mélange. La distillation est une opération très coûteuse en énergie ce qui explique le faible rendement énergétique global de la filière éthanol, excepté si le sucre est obtenu à partir de la canne à sucre.

2 Du bon usage de la betterave

c) Les différents rendements énergétiques des cultures sucrières.

+ La filière éthanol (CH₃-CH₂OH) de première génération

Ces glucides, le fructose, le glucose et les polymères formés à partir de ces deux monomères de base, sont essentiellement contenus dans les fruits et les graines.

Les huiles servent à l'élaboration des agrocarburants sont pour la plupart des huiles alimentaires. Elles sont obtenues par pressage de graines d'oléagineux colza, soja, tournesol... ou des fruits du palmier à huile.

Chimiquement ces huiles sont de la famille des triglycérides formés d'une molécule de glycérol liée à trois molécules d'acides gras. Ces huiles sont solubles dans les hydrocarbures, l'essence et le gazole. Elles peuvent soit les compléter soit les remplacer intégralement dans certains moteurs Diesel.

+ Pour en savoir plus Les agrocarburants obtenus à partir des huiles

4-3-2 Les limites de l'usage des agrocarburants

Actuellement les agrocarburants de première génération sont « chers ». Chers, mais par rapport à quelle référence de coût, par rapport à quel autre carburant ? Le coût des agrocarburants comporte essentiellement deux parties :

L'utilisation des huiles Les huiles peuvent être utilisées directement dans un moteur à explosion mais le rendement n'est pas optimum et la pollution est importante (mauvaise combustion). Les huiles végétales brutes n'ont pas les caractéristiques requises pour être directement substituée aux carburants dans les moteurs diesel couramment utilisés, elles doivent subir un traitement chimique préalable. Par réaction chimique avec le méthanol on obtient de l'ester méthylique (EMVH) appelé biodiesel. Sous la marque « Diester », le méthanol est obtenu par synthèse à partir du méthane (gaz naturel) ou des dérivés

de la canne à sucre est la plante donnant les meilleurs rendements, 6 m³ d'éthanol à l'hectare. Les tiges coupées sont pressées pour obtenir un jus sucré, le pied de la canne repousse après la coupe. La bagasse est le résidu énergétique obtenu, elle sert essentiellement à alimenter les chaudières des sucreries et des distilleries.

- la betterave à sucre est cultivée dans les pays à climat tempéré sur des terres riches. Le rendement, 6m³ d'éthanol/ha, est équivalent à celui de la canne à sucre, mais la culture et le traitement de la betterave sont plus complexes et onéreux, d'où un coût supérieur de l'éthanol produit à partir de la betterave. Les résidus des sucreries (la pulpe de betterave) sont utilisés pour l'alimentation animale.

- les autres cultures utilisées pour la production d'éthanol sont : > le maïs surtout utilisé en Amérique du Nord et Centrale (USA et Mexique). Cette culture exige beaucoup d'eau ce qui pose souvent problème quant à la répartition des eaux. Le rendement est plus faible, 3 m³ / ha. > le blé et l'orge sont utilisés en Europe, le rendement est encore plus faible, 2 m³ / ha. Le sous-produit est la drêche pour l'alimentation animale.

La manière de produire l'éthanol résulte de choix techniques et économiques propres à chaque région mais aussi de choix politiques notamment au travers des aides et subventions accordées à tel ou tel type de production.

Mélangé à l'essence dans des proportions variant de 5 à 85% (cas du Brésil), l'éthanol est directement utilisable dans les moteurs. Il peut également être modifié par réaction avec l'iso butylène pour obtenir l'éthyle-tertio-butyle-éther (ETBE) un antidétonant mélangé à l'essence à hauteur de 10 et jusqu'à 15 % (Notons que l'iso butylène est d'origine fossile). Les équivalents énergétiques : 100 litres d'éthanol sont équivalents à 66 litres d'essence et 100 litres d'ETBE sont équivalents à 84 litres d'essence.

- le coût de la production incluant la recherche, la production proprement dite et la distribution à la pompe,

- la fiscalité qui est essentiellement fonction de la volonté politique d'un Etat de favoriser ou non l'essor des agrocarburants... Cette volonté est très variable d'un pays à l'autre !

Cependant le développement des agrocarburants ne dépend pas que du seul coût de production et de distribution, il est également tributaire des conditions économiques, du cours éminemment fluctuant des hydrocarbures et des subventions accordées par les Etats.

Leur développement est également tributaire de l'acceptabilité sur le plan social des cultures destinées à leur production lorsque celles-ci entrent en concurrence avec les cultures à usage alimentaire ou mobilisent des surfaces et des ressources en eau d'irrigation initialement dévolues à d'autres cultures.

Le développement des agrocarburants doit enfin respecter un certain nombre de contraintes de nature écologique (effets de la déforestation, usure des sols, érosion...)

En conclusion, en France, et d'une manière générale dans les pays à climat tempéré, les agrocarburants de première génération ne peuvent pas constituer une alternative raisonnable aux produits pétroliers, à grande échelle et sur le long terme.

du pétrole. Le sous-produit de la réaction est le glycérol utilisé en chimie (peinture...).

En France 5% de biodiesel est couramment incorporé au gazole. Au-delà de 10% le biodiesel ne peut être utilisé que dans des moteurs conçus spécialement, en particulier dans les flottes de véhicules appartenant au « club des villes Diester » où le taux d'incorporation peut atteindre 30%. L'efficacité du biodiesel est légèrement inférieure (de 6% environ) à celle du gazole.

Nota. Selon les pays, l'accent est mis tantôt sur l'éthanol (USA, Brésil...) où les moteurs à essence prédominent, tantôt sur les huiles (France, Allemagne...) où le Diesel prédomine.

1 Désolé, je suis en train de sauver la planète



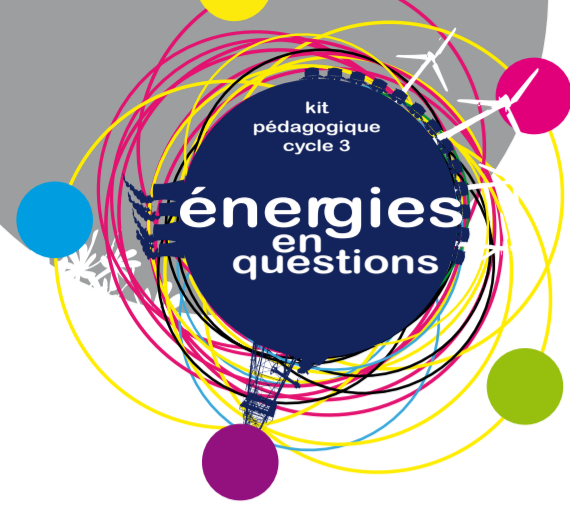
2 Du bon usage de la betterave



+ Les agrocarburants obtenus à partir des huiles

L'origine des huiles végétales utilisées pour la fabrication des agrocarburants :

- le palmier à huile (climat équatorial) a un rendement très important, 6 tonnes d'huile par hectare.
- les autres provenances sont le soja (climat tropical), le tournesol et le colza (climat tempéré). Les rendements sont moindres que pour le palmier à huile : 1,4 tonne/ha pour le colza, 0,8 tonne / ha pour le tournesol et le soja. Des essais sont actuellement conduits à partir de plantes rustiques cultivées dans des zones tropicales arides. Les huiles obtenues ne sont pas comestibles. Les rendements en huile de ces cultures en cours d'essais sont moindres que ceux obtenus dans les cultures pré-



Concernant les coûts de production dans les pays à climat équatorial produisant la canne à sucre et le palmier à huile (Brésil, Sud-Est Asiatique...), le seuil de rentabilité serait atteint dès lors que le prix du baril de pétrole dépasse 60 \$. Faut-il s'en réjouir ? Ce n'est pas l'avis des défenseurs de la nature qui s'inquiètent des énormes contrats passés entre les pays riches, États Unis en tête, et certains pays producteurs, contrats ayant pour conséquence la déforestation massive d'immenses surfaces de forêts primaires en vue de leur mise en culture (Brésil, Indonésie...). Quant aux agrocarburants issus de céréales, la FAO, l'agence de l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture, s'inquiète régulièrement des baisses de la production céréalière, suite aux aléas climatiques, sécheresses, pluies, inondations, ravage des insectes... Une alerte a été lancée en 2008. À l'été 2012 une nouvelle alerte est lancée en prévision d'une campagne céréalière désastreuse aux USA premier producteur mondial de maïs.

Les tensions sur le marché des céréales sont d'autant plus fortes que le volume des céréales consacré aux agrocarburants (actuellement 5 % de la production mondiale) est en augmentation constante et régulière. Pour la seule année 2009, cette augmentation a été de l'ordre de 20%.



3 Modification du génome des arbres pour accélérer leur croissance, un résultat inattendu !

4-3-3 Les agrocarburants de seconde génération, la filière ligno-cellulosique

Le développement des agrocarburants de première génération ne pourra pas se poursuivre de manière acceptable au-delà d'une limite imposée par le partage tolérable sur le plan humanitaire entre les cultures destinées à l'alimentation et celles destinées à la production d'agrocarburants. Vouloir résoudre les difficultés d'approvisionnement en hydrocarbures par un développement massif des agrocarburants de première génération conduirait inévitablement à de graves désordres. Les révoltes mexicaines et égyptiennes de 2008 en sont les prémices.

4 Pour en savoir plus Les carburants obtenus par la filière ligno-cellulosique

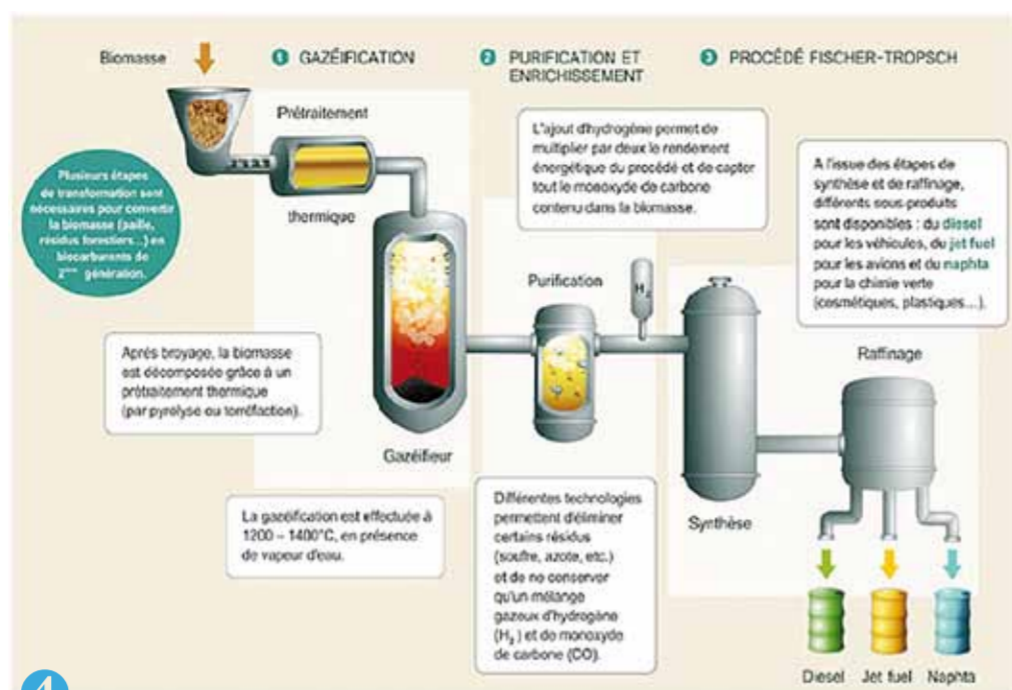
Tandis que les deux premières filières, éthanol et huiles, font appel à des matières nobles, (grains, sucres et huiles alimentaires) utilisés pour l'alimentation, la filière ligno-cellulosique, dite de **seconde génération**, fait appel aux résidus et déchets de culture, aux bois qui ne sont pas d'ouvrage, aux résidus issus du travail du bois (écorce, sciure, chutes...).

L'énorme avantage de la filière ligno-cellulosique est de ne pas être en concurrence avec l'alimentation humaine.

Cette filière prometteuse, n'en est cependant encore qu'à un stade préindustriel.

La voie la mieux étudiée, et a priori la plus prometteuse, est la **voie thermochimique de gazéification**. Le procédé thermochimique est un perfectionnement du procédé Fischer-Tropsch mis au point durant la seconde Guerre mondiale. Le schéma de principe du procédé est donné à la figure 4. Les carburants liquides sont obtenus en deux phases :

- la première phase est une **« pyrolyse »** (décomposition par la chaleur) de la biomasse à des températures élevées comprises entre 1 000 et 1 500°C.



4 Voie thermochimique de fabrication des carburants de synthèse (Procédé Fischer-Tropsch)

La biomasse est transformée en gaz dans le gazéifieur.

- lors de la seconde phase, la **« synthèse »**, le gaz (l'oxyde de carbone et l'hydrogène) résultant de la pyrolyse sont transformés en présence de catalyseurs en carburants liquides.

La voie thermochimique est elle-même une grosse consommatrice d'énergie. Globalement, en partant d'une tonne de biomasse on ne peut récupérer que l'équivalent de 0,2 tonne équivalent pétrole. En France la gazéification pourrait représenter un potentiel énergétique estimé à 6 ou 7 millions de tonnes équivalent pétrole (tep)

Plus futuriste, la filière des **agrocarburants de troisième génération** en est toujours à l'état de la recherche et au stade des installations pilotes. Ces carburants sont produits par photosynthèse à partir d'organismes aquatiques ou marins, des **algues**, cultivés soit en bassin soit dans des « photoréacteurs ».

Les rendements de cette filière de troisième génération, et donc la rentabilité de la filière, seraient meilleurs que ceux obtenus à partir des carburants de seconde génération. En dehors de tout effet d'annonce, ce point devra être confirmé.

5 L'incinération des déchets ménagers

Une des valorisations énergétiques des déchets ménagers collectés consiste à les incinérer. L'énergie produite par l'incinération d'un kilogramme de déchets (ou pouvoir calorifique du déchet exprimé en kWh par kilo) varie de 2 à 3 kWh/kg selon la nature du déchet. Cette énergie n'est pas négligeable, une tonne de déchets ménagers étant en moyenne équivalente à 0,22 tonne de pétrole. Pour la petite histoire, les déchets d'hiver, en particulier ceux de fin d'année, contiennent beaucoup de cendres et... de coquilles d'huître, ils constituent de ce fait un piètre combustible !

La combustion des déchets ménagers ne peut s'effectuer que dans des installations industrielles spécifiques.

Leur composition variable exige d'ajuster en permanence la quantité de comburant (d'oxygène) à la nature des déchets de manière à ce que leur combustion soit complète et génère le moins possible de gaz nocifs. Pour y parvenir, la combustion des déchets est assistée par des brûleurs, généralement alimentés en gaz.

Les déchets contenant en moyenne 10% de matière plastique, leur combustion nécessite de plus un traitement poussé des fumées, ce qui ne peut être réalisé que dans des installations complexes et de grande taille.

A titre indicatif, en France, on collecte par an 22 millions de tonnes de déchets ménagers (sur un total de 45 millions de tonnes de déchets produits) ce qui représente 365 kg par an et par habitant soit... un kilogramme de déchets ménagers par jour et par personne !

Toujours en France, 40 % des déchets ménagers collectés sont incinérés et, parmi ceux-ci, 80 % (soit 32 % du total) le sont avec récupération d'énergie. Une partie de l'énergie est directement utilisée sous forme de chaleur (ce qui correspond à 1% des besoins nationaux), l'autre partie est utilisée pour la production d'électricité (0,7% de la production nationale). A l'amont des incinérateurs, un tri magnétique permet la récupération de certains métaux.

A l'aval, les résidus de combustion (les imbrûlés) se présentent sous forme de mâchefers. Les déchets ultimes d'incinération non valorisables ne représentent que 2% de la masse initiale des déchets, ils sont (en principe) envoyés dans des centres classés de stockage spécifiques pour ce type de déchets. Quant aux déchets non incinérés, pour la plupart ils sont enfouis. Cette pratique est de moins en moins tolérée.

En conclusion

a) La biomasse est une énergie renouvelable à condition d'être correctement gérée. Son renouvellement doit être assuré, ce qui signifie que sa capacité de reproduction doit être au moins égale, sinon supérieure, aux prélèvements. Sous ces conditions, la biomasse constitue une énergie renouvelable.

b) Par rapport à la plupart des autres sources énergétiques carbonées, l'utilisation énergétique de la biomasse a un faible impact sur l'effet de serre. A défaut d'être parfaitement nul, le **« faible bilan carbone de la biomasse »** s'explique par le fait que la quantité de gaz carbonique rejetée par son utilisation (généralement par sa combustion ou sa fermentation) est égale à la quantité de CO₂ captée et stockée au cours de sa formation.

Si sa combustion s'effectue dans de bonnes conditions, l'utilisation énergétique de la biomasse ne fait que restituer à l'environnement le carbone qu'elle avait stocké pendant sa formation.

Le bilan absorption-rejet de CO₂ serait nul si les procédés utilisés en agriculture et par les industries de transformation qui lui sont associées n'émettaient pas eux-mêmes une certaine quantité de gaz à effet de serre dont le pouvoir radiatif est supérieur à celui du CO₂. Il s'agit essentiellement du méthane résultant des fermentations et des oxydes d'azote provenant de l'utilisation des engrais.

Il est à noter que certains changements d'affectation des sols, par exemple la déforestation pour gagner des surfaces de terres cultivables, sont des producteurs nets de CO₂.

c) L'énergie produite par la biomasse est une énergie dite **de stock**, ce qui signifie :

- que la biomasse permet, grâce à la photosynthèse, de « stocker » l'énergie lumineuse qu'elle a captée lors de sa formation sous forme de matière, d'énergie chimique. Cette énergie sera restituée lors de la combustion de la biomasse,
- que l'énergie « stockée » peut être restituée à la demande en fonction des besoins. Le stockage s'effectue à l'échelle de l'année (pour la biomasse annuelle) ou à plus long terme (décennies) dans le cas de la sylviculture.

Cette caractéristique différencie la biomasse de la plupart des autres énergies renouvelables intermittentes (éolienne ou photovoltaïque) dont l'énergie produite est difficilement stockable à grande échelle et dans de bonnes conditions économiques.

La production de biomasse peut cependant fluctuer de manière importante à l'échelle de l'année en fonction des aléas climatiques (grands froids, sécheresse, inondations...). Les fluctuations sont généralement moins importantes et erratiques pour les productions de la sylviculture que pour les cultures.

d) Indépendamment des fluctuations climatiques, la production de biomasse à usage énergétique peut subir des variations sur le court ou le long terme. Elle est encore aujourd'hui tributaire des aides et des subventions, elle est par ailleurs très sensible aux variations souvent artificielles des cours mondiaux (spéculation en cas de pénurie ou effondrement des cours en cas de surproduction).

Les variations, soit des aides soit des cours mondiaux, peuvent engendrer des sautes brutales de production générant des périodes d'instabilité au cours desquelles les pénuries alternent avec les surproductions. Des perturbations tout aussi catastrophiques l'une que l'autre.

Actuellement le développement rapide de la production des agrocarburants, surtout ceux à base d'huile de palme, est à l'origine d'un important défrichement destiné à la mise en culture de

soils précédemment occupés par des forêts ou par des prairies.

Le changement de destination des sols est fortement émetteur de gaz carbonique, ce CO₂ provenant de l'oxydation de l'humus des forêts. Finalement à l'échelle de la planète, le bilan du défrichement massif de forêts primaires est l'objet de nombreuses critiques relatives à son fort impact sociétal et écologique et aux doutes sur sa participation effective à la réduction globale des émissions de gaz à effet de serre.

1) La photosynthèse

C'est le processus par lequel, en présence de lumière, les végétaux chlorophylliens captent l'énergie lumineuse pour la « transformer » en énergie chimiquement utilisable et fabriquer les glucides de base. Ces glucides de base (les monomères) sont le fructose et le glucose communément appelés « sucres » ou hydrates de carbone par les chimistes. Ils sont à la base de la structure d'autres sucres plus complexes (des polymères) tels que le saccharose, les amidons, la cellulose qui permettent l'édification de la plante. La photosynthèse produit également d'autres substances végétales riches en énergie, ce sont les lipides (acides gras et acides aminés).

La synthèse de ces différents composés s'effectue à partir de l'eau contenue dans les cellules de la plante et du dioxyde de carbone (gaz carbonique ou CO₂) de l'atmosphère. La photosynthèse s'accompagne d'un dégagement d'oxygène. Globalement le schéma de la photosynthèse est le suivant : CO₂ + H₂O + énergie solaire => matière végétale + oxygène

Plus précisément : CO₂ + 2 H₂O + 8 photons => (CHOH) + H₂O + O

Le chaînon (CHOH) étant la base à partir duquel les différents glucides sont synthétisés. Ce chaînon est en fait constitué d'un atome de carbone... et d'une molécule d'eau !

Le Soleil, la betterave et... le caramel.

En Europe, l'un des sucres le plus utilisé pour l'alimentation est le saccharose extrait de la betterave. Schématiquement la molécule de saccharose est composée de carbone et d'eau. Chauffer du saccharose revient à éliminer progressivement l'eau qui en constitue la partie hydratée. Au fur et à mesure de l'élimination de l'eau, la couleur du sucre passe alors successivement du blanc au blond puis au roux et au brun. Il est alors grand temps d'arrêter le feu sous la casserole, le caramel est fait ! Attention... si on oublie le caramel sur le feu on en éliminera toute l'eau et, au fond de la casserole, il ne restera plus qu'un dépôt noir et solide... du carbone pur, autant dire du charbon ! Evidemment imangeable et une casserole quasi irrécupérable !

5 Fabrication du caramel à partir de saccharose

La compréhension du mécanisme extraordinairement complexe de la photosynthèse est une très longue aventure qui a débuté en 1772 lorsqu'un pasteur, physicien et philosophe anglais, Joseph Priestley (1733-1804), découvre que dans certaines circonstances les plantes vertes dégagent de l'oxygène. Quelques années plus tard Lavoisier montre que la respiration animale ou la combustion d'une chandelle produisent le même gaz formé de carbone et d'oxygène (le dioxyde de carbone). En 1779 un hollandais, Jan Ingenhousz montre que le dégagement d'oxygène par les plantes n'a lieu qu'en présence de lumière.

En 1782 il est de plus montré que le dioxyde de carbone et l'eau participent à la production d'oxygène par les plantes et qu'ils sont, avec la lumière, les éléments indispensables à cette production.

Ce n'est qu'au XX^{ème} siècle, après la seconde guerre mondiale, qu'une équipe de chercheurs de l'Université de Berkeley élucide le mécanisme des réactions photochimiques qui se déroulent à l'intérieur des cellules végétales

et qui aboutit à la synthèse des glucides. Ce processus, le cycle de Calvin, valut à M. Calvin le directeur de l'équipe, le Prix Nobel de chimie en 1961.

Dans les cellules des feuilles, ce sont des organites spécialisés, les chloroplastes porteurs de pigments photorécepteurs (la chlorophylle), qui captent l'énergie lumineuse pour réaliser la synthèse des glucides.

2) Les glucides (ou sucres ou hydrates de carbone)

Chimiquement les glucides sont des hydrates de carbone composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Les glucides de base les plus simples (les monomères) sont le glucose et le fructose. Ils contiennent 6 atomes de carbone, leur formule générique est de la forme C₆H₁₂O₆. Bien que le glucose et le fructose aient une formule chimique identique, l'arrangement dans l'espace des atomes à l'intérieur de leurs molécules y est différent. Cette disposition différente leur confère des propriétés également différentes. Chimiquement parlant, ce sont des isomères.

A partir de ces deux monomères de base les végétaux synthétisent des sucres plus complexes. Les plus connus sont :

- le saccharose, formé du fructose et du glucose. C'est le sucre extrait de la betterave, de la canne à sucre, de l'étréble... le plus couramment commercialisé dans nos pays
- la cellulose polymère du glucose formée par l'assemblage d'un grand nombre (n) de molécules de glucose, symboliquement (C₆H₁₀O₅)_n, « n » placé en indice signifie « n fois », « n » étant grand.

La cellulose constitue la partie consistante, dite ligneuse, des végétaux (bois des arbres, tronc, branches, écorce, tiges des végétaux...).

- l'amidon autre polymère formé de l'union de très nombreuses molécules de monomères, ce nombre variant de 30 à plusieurs milliers ! L'amidon est emmagasiné dans les organes de réserve des végétaux, graines et bulbes servant à leur reproduction (les grains de blé, de maïs, de riz, la pomme de terre...)

3) Les lipides végétaux, les acides gras et les acides aminés

Les acides gras

Tout comme les glucides, ils sont composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène formant une chaîne hydrocarbonée. Leur dénomination provient d'une particularité, de l'existence d'un groupement acide (-COOH dit groupement carboxylique) à l'intérieur de leur molécule.

Dans le monde végétal, on dénombre une centaine d'acides gras qui se distinguent les uns des autres par la structure et la longueur de leur chaîne hydrocarbonée.

Ils sont le plus souvent concentrés dans le fruit pour permettre à l'embryon de la plante de disposer de la source d'énergie nécessaire à son développement.

Les végétaux oléagineux dont les fruits sont les plus couramment utilisés pour l'alimentation sont l'olivier, l'arachide, le soja, le tournesol et le colza.

Le palmier à huile fournit à la fois l'huile de palme (contenu dans partie charnue du fruit) et l'huile de palme (contenu dans le noyau).

Les huiles extraites du lin ou du ricin sont utilisées industriellement (peinture, vernis, lubrifiants...)

4) Phytoplancton (plancton végétal)

Il est constitué d'une très grande variété de micro-organismes photosynthétiques qui vivent en suspension dans l'eau. Il est à la base de toute la chaîne alimentaire marine. A partir du dioxyde de carbone qu'il piège, et via la photosynthèse, le phytoplancton est un contributeur essentiel à la production d'oxygène.

Pour se développer, le phytoplancton utilise la lumière et des sels nutritifs qui remontent depuis les fonds marins vers la surface. Dans certaines régions océaniques la hausse de la température moyenne de la surface des océans favorise la stratification des températures, ce qui a pour effet de diminuer la remontée des sels nutritifs et d'affecter la nutrition du phytoplancton.

Une diminution de la quantité de phytoplancton présent au sein des océans est alors à l'origine d'une réaction en chaîne entraînant la diminution de la quantité de zooplancton (tel le krill) qui lui-même sert de nourriture aux espèces de grande taille, cétacés, phoques, manchots et oiseaux marins.

Photosynthèse, glucides, lipides et phytoplancton

3 Résultat inattendu de la modification du génome des arbres pour accélérer leur croissance

Quelques repères pour la filière thermochimique :

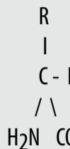
- les terres agricoles étant en mesure de produire de 10 à 15 tonnes de matière sèche / ha / an, à partir de biomasse cultivée, il est possible d'obtenir sous forme de carburant l'équivalent de 3 tonnes de pétrole / ha / an
- pour la sylviculture, la production en équivalent pétrole varierait de 1 à 2 tonnes par / ha / an



Fabrication du caramel à partir de saccharose

5 Les acides aminés

Ils sont également formés d'une chaîne hydrocarbonée. Ils contiennent au moins une fonction acide (-COOH) et, dans la même molécule, une fonction basique, dite fonction amine formée d'un atome d'azote et de deux atomes d'hydrogène, H₂N. Dans la nature il existe vingt acides aminés biologiques différents, tous (schéma ci-dessous) sont organisés autour d'un atome de carbone central qui porte la fonction acide, la fonction amine, un atome hydrogène et un radical (R). Ce radical différencie chacun des vingt acides aminés en lui conférant ses propriétés propres.



Un acide aminé possédant à la fois une fonction « acide » et une fonction « base » peut réagir et s'associer avec un ou plusieurs autres acides aminés. L'ensemble peut alors former une structure spatiale de plusieurs centaines, voire de milliers, d'unités d'acides aminés élémentaires (liaisons peptidiques). C'est ainsi, en reliant les acides aminés entre eux selon un ordre d'assemblage (ou séquence) rigoureusement déterminé, que s'effectue la synthèse des protéines à l'intérieur des cellules.

Ces vingt acides aminés biologiques sont les « briques » à partir desquelles se construisent les protéines qui participent au métabolisme du monde vivant végétal et animal.

Nota. Chaque organisme vivant renouvelle régulièrement l'ensemble de ses protéines, ce renouvellement (et l'élimination associée) doit être compensé par la nourriture. Certains acides aminés, huit sur les vingt dont l'organisme de l'Homme a besoin, ne sont pas synthétisés par son organisme, ils doivent donc être présents dans son alimentation. L'absence ou le déficit d'un de ces acides aminés essentiels conduit à des carences alimentaires. Ainsi dans certains pays (Japon, Thaïlande...) un apport complémentaire de lysine et de thréonine est nécessaire à une alimentation déficitaire à base de riz.

4 Les carburants obtenus par la filière ligno-cellulosique

Trois types de molécules, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont présentes dans la paroi des cellules végétales, tiges des plantes, tronc et branches des arbres... La cellulose est la plus abondante, elle constitue 45% du bois. C'est un polymère formé d'un très grand nombre de molécules de glucose, un sucre à 6 atomes de carbone. L'hémicellulose, 25% du bois, est un long polymère dont la base est la xylose, un sucre à 5 atomes de carbone. Les lignines, 23% du bois, sont des polymères complexes formés d'alcools aromatiques.

Afin de produire des carburants à partir de ces molécules, il est nécessaire dans un premier temps de dissocier ces molécules géantes en sucres plus simples. Ces molécules

géantes conférant au bois sa solidité et sa résistance à l'action des micro-organismes sont évidemment chimiquement très stables, leur désintégration n'est donc pas chose aisée. Pour y parvenir, deux voies sont possibles :

a) La voie biochimique

Par action d'enzymes extraites de champignons on parvient à dissocier ces molécules. Après la « digestion » enzymatique de la cellulose, on obtient des sucres, puis, par fermentation, de l'éthanol. L'hémicellulose donne des sucres à 5 atomes de carbone (la xylose) dont la fermentation est par contre assez malaisée.

La désintégration biochimique reste un procédé très lent

qui la rend peu rentable. Des recherches sont en cours dans le but d'en améliorer l'efficacité et la rapidité.

b) La voie thermochimique de gazéification

C'est la voie la mieux étudiée et a priori la plus prometteuse car elle est ouverte à un large éventail de ressources tant agricoles que forestières. Selon certains scénarios, elle pourrait à terme substituer pour moitié à nos besoins en carburants routiers.

Après séchage et en absence d'oxygène, la biomasse est chauffée vers 600 °C. Les molécules qui la composent sont dissociées et se retrouvent sous forme d'un mélange gazeux représentant 70% de la masse initiale

de la biomasse. Ce mélange est composé de CO₂, de monoxyde de carbone (CO), de méthane (CH₄), d'hydrogène (H₂) et de goudrons condensables. Le résidu solide est constitué de carbone (charbon de bois) et de sels minéraux.

Le mélange gazeux est ensuite traité à l'aide de catalyseurs pour obtenir du méthanol (autrefois appelé « alcool de bois ») et des hydrocarbures lourds du type gazole. La gazéification du carbone se poursuit jusqu'à 900-1000°C en présence d'air, d'oxygène ou de vapeur d'eau selon le procédé retenu. L'hydrogène est récupéré pour être utilisé seul comme carburant (pile à

combustible) ou, en utilisant la synthèse de Fischer-Tropsch (monoxyde de carbone + hydrogène), pour fabriquer des hydrocarbures directement utilisables dans les moteurs.

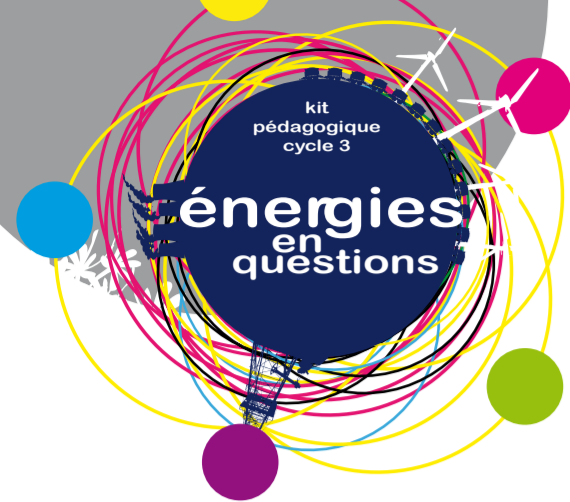
Cette dernière opération (Synthèse de Fischer Tropsch) peut atteindre un rendement de 55%. Ce rendement est le rapport entre l'énergie que peut produire le carburant obtenu et la somme des énergies consommées, biomasse comprise, pour obtenir ce carburant.

Les différentes méthodes thermochimiques sont prometteuses mais nécessitent encore de nombreuses recherches et mises au point afin d'améliorer les procédés, les rendements et de diminuer les coûts de production. Ces méthodes nécessitent une importante consommation d'énergie et ne sont intéressantes

que si l'énergie provient... de la biomasse elle-même !

En France l'Institut français du pétrole et le Commissariat à l'Énergie Atomique participent activement à ces recherches. Outre les filières bois, paille, déchets de scierie ou de l'agriculture... existantes, de nouvelles cultures de plantes à forte production de biomasse ligno-cellulosique devront être développées.

Ce sont les filières utilisant les arbres dits à rotation rapide (saule, peupliers... de faible qualité en tant que bois d'œuvre) et des herbacées de la famille des graminées à forte production mais faiblement exigeantes en eau et quant à la richesse des sols : miscanthus, la canne de Provence, les triticales (hybrides de blé et de seigle), le panic érigé (graminée vivace ou annuelle dite Switch Grass).



L'air est constitué de molécules (d'azote, d'oxygène, de CO₂, de gaz rares...etc.), chaque molécule a une masse et, sous l'effet de la pesanteur, un « poids » qui l'attire vers le centre de la terre. La masse d'un mètre cube d'air est de 1,23 kilogramme. Imaginons une colonne d'air allant depuis le sol jusqu'aux couches les plus hautes de la stratosphère. L'air ayant une masse, cette colonne d'air a un « poids » et, au travers de ce poids, exerce sur le sol une pression que l'on nomme « pression atmosphérique ». Elle est de 1033 millibars dans les conditions dites « normales ». Ce rappel étant fait, quel est le lien existant entre le Soleil, une colonne d'air, son poids, la pression qu'elle exerce sur le sol et le vent ?

Lorsque le Soleil chauffe un certain volume d'air, l'agitation des molécules de cet air augmente et se traduit par la dilatation de ce volume. Il en résulte que le nombre de molécules contenues dans une colonne de volume constant chauffée par le Soleil diminue et devient inférieur au nombre de molécules d'air initialement contenues dans la même colonne froide. Le poids de la colonne chauffée est donc moindre et la pression qu'elle exerce sur le sol est également moindre. Chauffer une colonne d'air revient donc à diminuer la pression qu'elle exerce au sol. C'est ainsi que se crée une zone de moindre pression.

A une plus grande échelle, à celle de la surface de la Terre, la création d'une zone de basse pression a pour conséquence d'attirer vers elle des masses d'air en provenance de zones à des pressions plus élevées. C'est ainsi que l'énergie provenant du Soleil génère au niveau du sol le mouvement de masses d'air de densité différente, depuis des zones où les pressions sont les plus élevées vers des zones où elles sont les plus basses.

La brise marine qui naît à une certaine heure de la journée, quand l'air s'échauffe plus vite au-dessus des sols qu'au-dessus de l'eau, est l'exemple même de ce phénomène.

Ce même phénomène s'observe à plusieurs échelles. A l'échelle planétaire, ce sont les vents dominants tels les alizés et, à une échelle beaucoup plus petite, c'est le courant d'air qui se crée entre la partie exposée au soleil et la partie située à l'ombre d'un immeuble.



L'origine des vents

L'énergie éolienne

1) Rien de tellement nouveau sous le Soleil !

Depuis la plus haute antiquité l'humanité a su utiliser l'énergie transportée par les vents. Elle fut employée à la propulsion des bateaux puis, à partir du Moyen Age, son utilisation s'est étendue aux moulins. Jusqu'au XXème siècle, l'énergie éolienne connaît peu de bouleversements, aucune grande innovation ne venant améliorer les technologies existantes. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XXème siècle, suite aux chocs pétroliers des années 1970, que la récupération de l'énergie du vent connaît un véritable essor. Celui-ci débute réellement au Danemark, pays idéal pour le développement de l'éolien : pays particulièrement venteux, plat comme le dos de la main et constitué d'une multitude d'îles. Depuis lors l'essor de l'énergie éolienne est devenu fulgurant, suivant pour l'instant une croissance exponentielle, la puissance installée doublant tous les quatre ans. En 2010 la puissance mondiale installée était de 150 GW pour une production de près de 350 TWh. Pour 2015 les prévisions sont respectivement de 300 GW et de 600 TWh.

2) Quelques petites considérations théoriques

2-1 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne, comme toutes les énergies renouvelables (à l'exception de la géothermie) est une forme d'énergie qui nous vient du Soleil via les mouvements de l'atmosphère qu'il génère. Comment les mouvements de l'atmosphère sont-ils générés ?



Pour en savoir plus
L'origine des vents

En résumé, le vent n'est autre qu'une masse d'air qui a été mise en mouvement entre deux zones dont les pressions atmosphériques diffèrent.

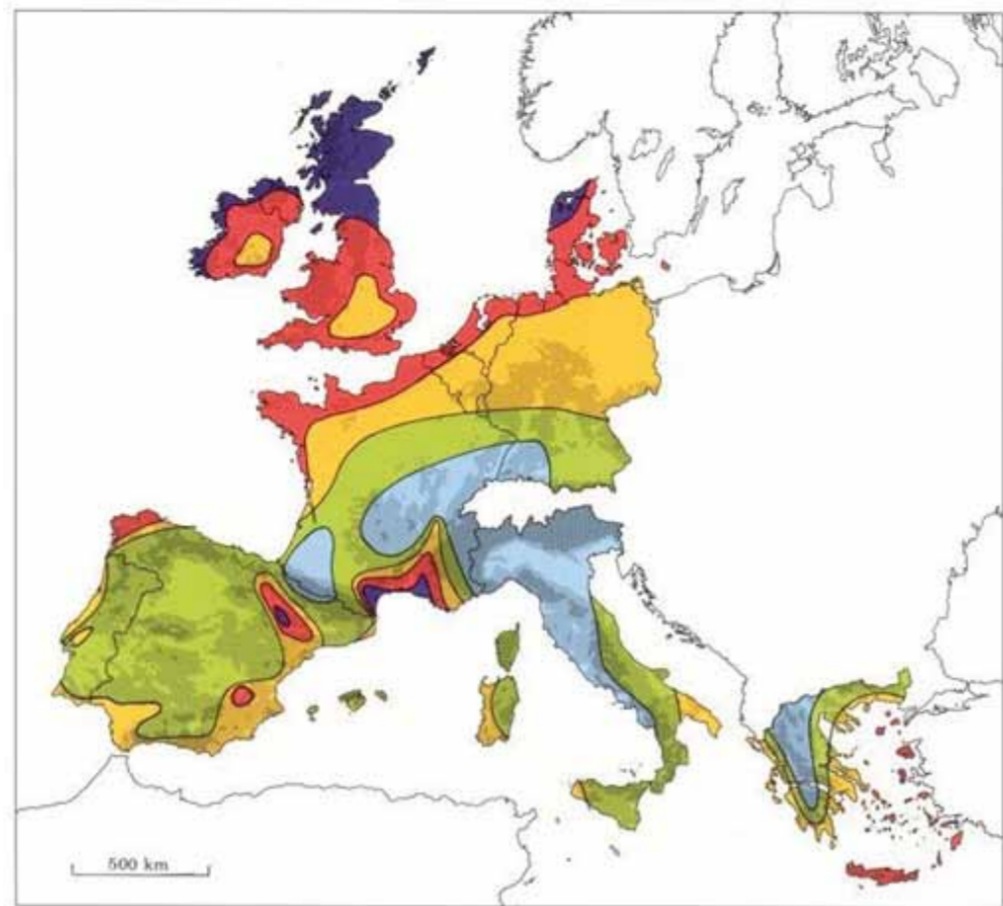
2-2 NATURE DE L'ÉNERGIE TRANSPORTÉE PAR LE MOUVEMENT DES MASSES D'AIR



Pour en savoir plus
Quelle est l'énergie potentielle du vent traversant une éolienne ?

1) Quelle est l'énergie potentielle du vent traversant une éolienne ?

Comme toute masse « M » animée d'une vitesse « V », une masse d'air « M » animée d'une vitesse



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

2) Potentiel éolien de l'Europe occidentale en W/m²

« V » possède une énergie cinétique égale à ½ MV². C'est cette énergie cinétique des masses d'air en mouvement que l'on récupère partiellement à l'aide des moulins à vent, devenus aujourd'hui les éoliennes.

2-3 PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE

Une éolienne ne peut évidemment pas récupérer l'intégralité de l'énergie cinétique de la masse d'air qui la traverse, elle n'en récupère qu'une partie, environ 50% dans des conditions optimales, pour un vent de 50 km/h. Les éoliennes sont généralement conçues de manière à ce que leur puissance maximale, dite « **puissance nominale** », soit atteinte dès que la vitesse du vent est de 50 km/h (diagramme de puissance d'une éolienne, figure 1). En dessous d'une vitesse du vent de 15 km/h la puissance d'une éolienne étant quasi nulle, celle-ci est mise à l'arrêt. Au-dessus de 50 km/h et jusqu'à des vents de 90 km/h la puissance d'une éolienne est régulière et maintenue constante en jouant sur l'orientation (sur la portance) de ses pales. Afin d'éviter sa destruction au-dessus d'une vitesse de vent de 90 km/h, une éolienne, est mise à l'arrêt. Ses pales sont mises en « drapeau » (leur portance devient nulle) et ses freins la maintiennent à l'arrêt. Quelques ordres de grandeur : les éoliennes terrestres couramment construites aujourd'hui ont une puissance de 3 MW électrique pour un diamètre de 90 m.

Les nouvelles éoliennes installées au large des

côtes (éoliennes off-shore) ont des puissances encore plus élevées, 5 à 6 MW électriques (voir dossier Internet consacré à l'éolien off-shore sur www.fers.asso.fr/energies-en-questions).

3) Le potentiel éolien

Le potentiel éolien est très variable d'une région du globe à l'autre. On ne s'intéressera ici qu'au potentiel éolien de l'Europe de l'Ouest (figure 2). Cette carte du potentiel éolien des pays de l'Europe de l'Ouest possédant des façades maritimes indique la vitesse du vent en mètres par seconde (colonnes ms⁻¹) et l'énergie cinétique du vent en watt par mètre carré (colonnes W/m²) selon que l'on se trouve à l'intérieur des terres en site protégé, en rase campagne, sur une crête, en bordure de mer ou en pleine mer. Les vitesses du vent sont mesurées à une altitude de 50 m au-dessus du sol, une altitude où le vent est moins tourbillonnaire et où ses vitesses sont mieux stabilisées.

On remarque que pour une région donnée (par exemple l'Ecosse en bleu foncé), l'énergie cinétique des masses d'air récupérable varie considérablement, d'un facteur 1 à 8 environ, selon que l'éolienne est implantée dans un endroit protégé (sheltered terrain), en terrain ouvert (open plain), en bordure de mer (sea coast), en pleine mer (open sea) ou sur une crête (ridge).

Ces écarts entre quantités d'énergie cinétique récupérables s'expliquent principalement par la turbulence créée au voisinage du sol par les accidents de terrain. Ces turbulences génèrent de fortes fluctuations de vitesse qui affectent consi-

dérablement le rendement des éoliennes tout en sollicitant les structures et les pales en fatigue. Les meilleurs rendements sont obtenus par les éoliennes implantées en pleine mer, les vents y sont moins turbulents, plus forts, plus réguliers. Le potentiel éolien d'un parc de production s'évalue en divisant la **production annuelle** de ce parc (exprimée en MWh) par la **puissance nominale** de ce parc (exprimée en MW). Le résultat de la division de mégawattheure par des mégawatts est (évidemment !) un nombre d'heures, il représente le nombre des heures pendant lesquelles le parc éolien aurait dû fonctionner à sa pleine puissance pour produire cette quantité d'énergie.

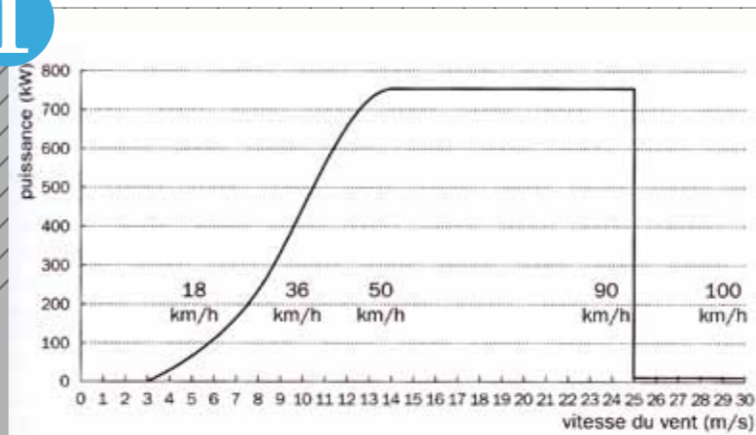
Ce nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale est appelé « **nombre d'heures équivalent pleine puissance** » ou « **hepp** » (voir tableau ci-après). Il caractérise le potentiel éolien d'un parc ou d'une région : plus il est élevé, meilleur est ce potentiel. On caractérise également le potentiel éolien par un paramètre équivalent, plus « parlant », le « **coefficient annuel de charge** ». Le coefficient annuel de charge s'exprime en %, il s'obtient en divisant le nombre d'heures équivalent pleine puissance, « hepp », par le nombre d'heures que comporte une année, soit par 8600. La figure 3 donne les statistiques françaises obtenues pour l'année 2010. Le classement des régions (par ordre décroissant) est établi en fonction des « heures équivalent pleine puissance » (hepp) effectivement mesurées et du « coefficient annuel de charge » qui en découle.

Région	Puissance installée en MW	Production annuelle en GWh	hepp	Coef charge en %
Provence-Côte d'Azur	45	120	2667	31 %
Languedoc-Roussillon	452	1201	2657	31 %
Rhône-Alpes	155	384	2477	29 %
Centre	557	1088	1953	23 %
Franche Comté	30	52	1733	20 %
Nord-Pas de Calais	345	588	1704	20 %
Picardie	824	1339	1625	19 %
Pays de Loire	398	634	1593	19 %
Haute Normandie	136	215	1581	19 %
Auvergne	150	233	1553	18 %
Basse Normandie	198	301	1520	18 %
Corse	18	27	1500	17 %
Lorraine	563	834	1480	17 %
Bourgogne	62	89	1435	17 %
Poitou-Charentes	155	214	1381	16 %
Champagne-Ardenne	833	1018	1222	14 %
Diverses autres régions	43	19	442	5 %
Bretagne (*données invalides)	747	925	*	*
TOTAL	6107	9978	1634	19 %

3) Statistique de production éolienne 2010 établi par région



Quelle est l'énergie potentielle du vent traversant une éolienne ?



Ce tableau montre, pour 2010 et selon les régions, que le coefficient de charge varie de 30-31% pour Provence Côte d'Azur, Languedoc Roussillon, Vallée du Rhône, aux environs de 15 % pour les régions Poitou Charente, Champagne Ardennes. En moyenne, en 2010, le parc éolien français a fonctionné l'équivalent de 19% du temps à pleine puissance. En 2011, le coefficient de charge moyen français a été supérieur et a atteint 22,4 %

Il faut ici corriger une erreur souvent commise au sujet de la production des éoliennes pour lesquelles on entretient (volontairement ou non.) la confusion entre la **puissance nominale**, c'est-à-dire la puissance maximale à laquelle une éolienne peut fonctionner, et la **puissance moyenne effective** de cette éolienne sur une année qui est la seule puissance significative à prendre en considération pour accéder à sa **production annuelle**. Entre ces deux puissances, la « nominale » et « l'effective », intervient le facteur de charge. La valeur moyenne de ce coefficient de charge en France est comprise, selon les régions et l'année, entre 20% et 23%. Lorsque, pour un parc éolien, on ne distingue pas ces deux puissances, ce qui est très généralement le cas, on surestime d'un facteur 4 à 5 la production annuelle de ce parc.

4) La variabilité et l'intermittence de la production éolienne

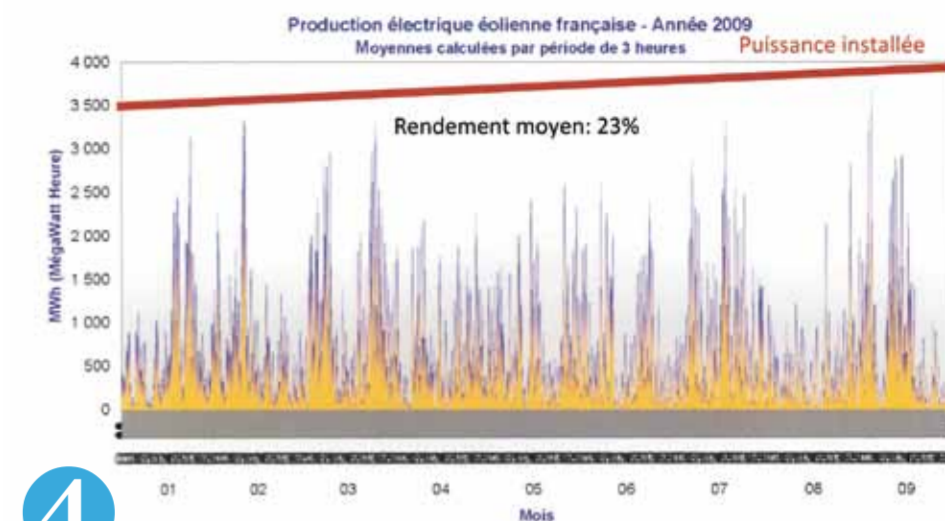
La production d'électricité à partir des éoliennes n'est pas ajustable en fonction des besoins et de la demande du réseau électrique. Tout comme l'énergie électrique produite par les centrales hydrauliques au fil de l'eau, la production éolienne est qualifiée de « **production fatale** », ce qui signifie que l'on bénéficie de cette production « **quand elle vient et comme elle vient** ». La production éolienne est intermittente et n'est prévisible avec une bonne précision qu'à l'échelle de la journée. Cette variabilité est illustrée par l'histogramme (figure 4) montrant par tranches de 3 heures, la production de l'ensemble du parc éolien français entre janvier et septembre 2009 (une période de 3 heures correspond à une raie bleue).



4) Production éolienne française de janvier à septembre 2009

Cet histogramme montre l'importante variabilité de la production éolienne. Dans certaines plages de vitesse du vent, une variation de cette vitesse peut entraîner de brutales variations de puissance, c'est le cas lorsque ces vitesses : - sont inférieures à 50 km/h. Dans cette zone de vitesses la puissance des éoliennes est proportionnelle au cube de la vitesse, cette loi de proportionnalité accentue très fortement l'importance des fluctuations de la vitesse du vent sur la production électrique. Un doublement (ou une réduction de moitié) de la vitesse se traduit par des fluctuations amplifiées, en plus ou en moins, d'un facteur 8 sur la puissance. Ces plages de vitesses sont assez courantes pour l'éolien terrestre.

France: variation par périodes de 3 h de janvier à septembre 2009



4) Production éolienne française de janvier à septembre 2009

- sont voisines de 90 km/h. A ces vitesses les éoliennes sont volontairement mises à l'arrêt afin d'éviter leur endommagement. La variation de puissance est alors très brutale, celle-ci passant instantanément de la puissance maximale des éoliennes à une puissance nulle.

En fonction du relevé de la production du parc éolien national (figure 4), on calcule la probabilité (en %) pour, qu'à un instant donné, la production de ce parc soit supérieure à un certain niveau de production **W** (exprimé en MW). A titre d'exemple et exprimé de manière plus explicite les relevés montrent que, sur l'année 2010, pendant **95% du temps le parc éolien français a fonctionné à une puissance supérieure à 450 MW**.

La puissance de 450 MW représente 7,2 % de la puissance nominale totale du parc éolien, 6 107 MW, installé à la fin 2010.

Ce niveau de probabilité de 95 % sert à définir la « **puissance garantie** » d'un parc de production éolien. Sur une année, la puissance garantie est définie comme étant la **puissance au-dessus de laquelle statistiquement ce parc fonctionne pendant 95% du temps**. En France, en 2012, la puissance garantie pendant 95% du temps (soit pendant 8200 heures sur les 8 760 heures que compte une année) était égale à 450 MW.

La puissance garantie est un paramètre important. Il permet aux producteurs d'électricité de dimensionner le parc de production thermique ou nucléaire qui doit se substituer à l'insuffisance du parc éolien lorsque les vents sont faibles ou nuls.



La production garantie

5) L'éolien Off-shore

Pour minimiser les inconvénients liés à l'intermittence et au relativement faible taux de charge de l'éolien terrestre, la tendance actuelle est à la construction des parcs éoliens en pleine mer. Cet éolien est **l'éolien off-shore**.

En mer les vents sont plus forts, plus réguliers et moins turbulents que sur terre ce qui permet d'obtenir des taux de charge beaucoup plus importants. Alors que sur terre le taux de charge moyen d'un parc éolien en France est de 23%,

correspondant à un fonctionnement équivalent à pleine puissance de 2 000 heures/an, le taux de charge d'un parc éolien off-shore peut atteindre plus de 3000 h de fonctionnement équivalent à pleine puissance, voire, dans les cas les plus favorables, 4000 hepp.

En contrepartie, l'éolien offshore nécessite des investissements beaucoup plus importants. La construction, l'exploitation et la maintenance d'un parc offshore sont plus complexes et plus onéreuses, elles nécessitent des installations portuaires et d'importants moyens logistiques spécifiques.

L'Europe est à l'avant-garde du développement de l'offshore puisque, en 2010, 97% des éoliennes offshore appartenaient à des parcs de production européens (Mer du Nord, Manche, côtes d'Ecosse...) totalisant une puissance installée de 3 GW répartie entre le Royaume Uni (40%), le Danemark (30%) les Pays-Bas (10%) et plus récemment l'Allemagne.

Selon les constructeurs, à l'horizon 2020, les projets prévoient pour l'Europe une puissance installée de 35 GW répartie entre le Royaume-Uni (13 GW), l'Allemagne (10 GW), la France et les Pays-Bas pour 6 GW chacun.

Sera-t-il possible de tenir un objectif aussi ambitieux sachant que pour l'atteindre il faudrait d'ici 2020 installer en mer 2 turbines chaque jour ? Pour contourner les difficultés rencontrées par l'éolien off-shore actuel, posé ou ancré, de nouvelles technologies sont en cours d'étude ou d'expérimentation. Elles ont pour but de s'affranchir des contraintes liées à la profondeur et donc, dans une certaine mesure seulement, de l'éloignement des côtes. Toutes font appel au concept d'« **éolienne flottante** ».

Les éoliennes flottantes sont solidaires d'un flotteur dont le type varie selon les projets : flotteurs à grand tirant d'eau, semi-submersibles... etc. Depuis septembre 2009, la première éolienne flottante de grande taille, Hynd, est testée au large de la Norvège. Une éolienne semi-submersible, Windfloat, est également en essai depuis décembre 2011 au large du Portugal. La France réalise un prototype d'éolienne flottante en collaboration entre les Chantiers navals de Saint Nazaire et l'antenne de l'Ecole Centrale de Nantes. Il sera installé au large de Saint Nazaire.



Quelle est l'énergie potentielle du vent traversant une éolienne ?

Un petit calcul (peu compliqué !) explicite les performances des éoliennes en fonction de la vitesse du vent. La surface S balayée par les pales d'une éolienne de diamètre R en rotation est $S = \pi R^2$. Jusqu'à présent pas de problème... la formule donnant la surface d'un cercle en fonction du rayon est généralement connue ! Considérons maintenant la masse de l'air qui passe chaque seconde à la vitesse **V** au travers de l'aire **S** balayée par les pales de l'éolienne. La masse d'air passant au travers de cette surface à la forme d'un cylindre dont le volume est égal au produit de la sur-

face S balayée par les pales par la vitesse V du vent, soit SV. Si **p** est la masse volumique de l'air (soit 1,23 kg/m³), la masse d'air M qui traverse l'éolienne chaque seconde est le produit du volume d'air traversant l'éolienne (SV) par sa masse volumique p, soit M = pSV. L'énergie cinétique E de cette masse d'air M animée de la vitesse V s'exprime, comme toute énergie cinétique de la manière suivante :

$$E = \frac{1}{2} M V^2 = \frac{1}{2} p S V^3$$

Deux conclusions majeures sont à retenir de ce petit calcul : a) l'énergie « transportée » par l'air passant au travers d'une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse V du vent. Si la vitesse du vent double, par exemple passe de 20 à 40 km/h, l'énergie qui traverse l'éolienne sera multipliée par « 2 au cube », soit par 8. Au contraire si elle passe de 40 à 20 km/h l'énergie sera divisée par 8.

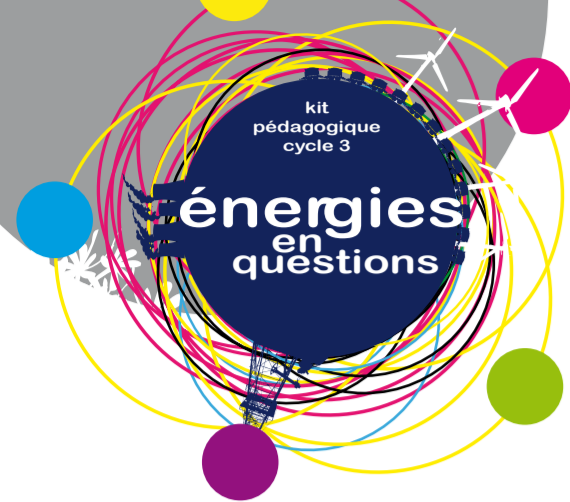
b) la surface balayée par les pales étant proportionnelle au carré du rayon d'une éolienne, l'énergie cinétique de la masse d'air potentiellement récupé-

table par une éolienne est proportionnelle au carré de son diamètre D. Finalement la puissance d'une éolienne s'exprime théoriquement par une formule de la forme

$$P = k D^2 V^3$$

Où k est un coefficient aérodynamique propre à chaque machine, D son diamètre et V la vitesse du vent.

Mais dans la pratique, (figure 1) une éolienne est pilotée de manière à ce que sa puissance reste constante lorsque la vitesse du vent devient supérieure à 50km/h. La loi ci-dessus du cube de la vitesse ne s'applique donc qu'en dessous de 50 km/h.



L'avantage offert par les gains de productivité de l'off-shore, surtout par celui situé le plus loin des côtes, est contrebalancé par les difficultés liées à l'éloignement, à la profondeur de l'eau et aux conditions atmosphériques et environnementales hostiles : vents, houle de grande ampleur, tempêtes...

Sachant que les opérations de maintenance ne sont pas toujours réalisables en période hivernale en raison de la houle et des tempêtes, les machines doivent être conçues et largement dimensionnées pour résister aux agressions externes (salinité, intempéries...) et à des sollicitations intenses (contraintes mécaniques élevées, fatigue des matériaux...).

Le coût des infrastructures (fondations, raccordement électrique...) et de la logistique (installation, accès aux éoliennes pour les opérations de dépannage ou de maintenance...) conduit de plus en plus à privilégier des machines de forte puissance comprise entre 3,5 et 6 MW afin d'assurer la rentabilité des projets.

La majorité des réalisations actuelles se cantonnent cependant encore dans un domaine de profondeur modeste, inférieur à 25 m, et à des éloignements des côtes de 20 km au maximum. Par exemple le parc éolien off-shore de Robbin Rigg en Écosse bénéficie d'une faible profondeur (5 m), et d'un éloignement modéré des côtes (10 km).

Certains projets en cours de réalisation en Mer du Nord sont plus audacieux, London Array au large de l'embouchure de la Tamise (profondeur 15 m, éloignement 20 km).

Le projet le plus audacieux en cours de réalisation est manifestement le projet allemand Alpha Ventus situé à 35 km des côtes pour une profondeur de l'eau de 30 m. Ce parc est composé de 12 éoliennes de 5 Mw, de 120 m de diamètre, l'axe du rotor de la turbine étant situé à une hauteur de 90 m.

L'estimation (sur le « papier ») du coût de ces futurs parcs offshore lointains varie entre 1 et 3 milliards d'€ pour des puissances installées de 100 à 300 MW électriques. Les premières réalisations permettront soit de valider soit de corriger les estimations actuelles.

Les réponses aux premiers appels d'offre lancés par le gouvernement français pour équiper les sites offshore situés au large des côtes bretonnes et normandes serviront de références économiques.

Le coût du mégawattheure produit par les projets éoliens retenus est de 220 € à comparer au coût moyen de production (hors transport et distribution) de 39 € / MWh (données 2011) pour l'ensemble du parc de production français (nucléaire, hydraulique, fossile, renouvelable...).

+ L'éolien Off-shore

Quelques ordres de grandeurs concernant les éoliennes off-shore.

La puissance des éoliennes actuellement installées varie de 2 à 6 MW.

En fonction de leur puissance, la hauteur des mâts varie de 85 à plus de 135 m, leur masse est comprise entre 170 et 250 t.

La masse de la nacelle qui renferme la partie mécanique et électrique de l'éolienne (rotor, multiplicateur, générateur électrique et les systèmes de contrôle commande...) dépasse 90 tonnes pour les machines les plus puissantes.

Pour une machine de 5 MW, la longueur d'une pale atteint 45 m et sa masse plus de 3,5 t

Quelques ordres de grandeurs concernant les fondations des éoliennes en mer :

- les fondations « gravitaires » sont constituées d'une masse de béton armé posée. En moyenne la masse des fondations est de 500 t par MW de puissance installée, donc 3 000 t pour une éolienne de 6 MW.

- les fondations « mono pieu » sont constituées d'un pieu unique (300 t) enfoncé d'une trentaine de mètres dans le sous-sol.

La profondeur de l'eau limite pour ces deux premiers types de fondation est d'une trentaine de mètres.

- Au-delà de cette profondeur, et pour les machines les plus puissantes (5 et 6 MW), le mât des éoliennes est solidaire d'une structure métallique formée de tripodes ou de treillis tubulaire.

6 Structure support des éoliennes off-shore

Cette structure est elle-même posée ou ancrée sur des pieux enfoncés dans le sous-sol marin.

Un tripode peut atteindre 50 m de haut, une masse de 700 t et la masse des pieux de fixation, 100 t.

Il s'agit de structures métalliques colossales nécessitant des installations portuaires et des moyens de manutention exceptionnels (grues flottantes de grande capacité, navires spécialisés...). Leur pose ne demande cependant que quelques jours, 2 ou 3 tout au plus !

Nota : ces chiffres impressionnants, tonnages de béton (de 1500 à 3000t) ou d'acier (plus de 1000 t au total pour des éoliennes de 2 à 5 MW de puissance), donnent une idée de l'ampleur des moyens à mettre en œuvre pour capter l'énergie éolienne off-shore.

Concernant l'éolien, tant que sa participation à la production électrique du réseau général reste modeste, il est possible de compenser facilement les écarts instantanés, en plus ou en moins, de sa production en modulant la production des autres moyens de production.

En revanche, lorsque suite à son développement, la participation de l'éolien deviendra significative par rapport aux autres moyens de production, les exigences de stabilité et de sécurité nécessiteront de pouvoir disposer de moyens au fonctionnement souple, à la puissance facilement modulable, spécifiquement placés en réserve. Ces moyens de production devront fonctionner à charge partielle et être capables de changer rapidement (en plus ou en moins) de régime de fonctionnement pour compenser les fluctuations de la production éolienne.

A titre d'illustration, au Nord de l'Europe, le réseau géré par la société E.ON regroupant 5 000 éoliennes pour une puissance totale installée de 5 000 MW a connu une variation brutale de puissance de 4 000MW de son parc éolien (soit 80% de sa puissance totale de ce parc) sur une période inférieure à 4 heures. Cette brutale variation a constitué un risque important d'effondrement de l'ensemble du réseau.

Fin 2009, une autre variation brutale de la production éolienne en Mer du Nord s'est produite simultanément avec la défaillance d'une importante ligne à très haute tension. Cet événement a plongé l'Europe du Nord dans le noir avec les multiples problèmes qu'une telle défaillance ne manque pas de créer en période hivernale.

A ce jour les solutions permettant de faire face, de manière efficace et fiable aux problèmes de stabilité et de sécurité des réseaux électriques liés à l'intermittence et aux brusques variations de puissance de l'éolien, sont :

a) l'équipement des réseaux électriques en **moyens de production en réserve** prêts à suivre les fluctuations de la production éolienne et à répondre aux besoins du réseau. Des moyens souples, capables de monter en puissance ou au contraire de s'effacer afin de suivre et de compenser ces fluctuations. Les moyens les plus adaptés, capables de répondre au mieux aux besoins, sont les centrales thermiques à combustible fossile, si possible à gaz pour minimiser les rejets de gaz à effet de serre. C'est par exemple la politique d'équipement suivie en Allemagne où une vingtaine de centrales thermiques (brûlant du gaz, du lignite ou du charbon) sont en cours de construction ou en projet pour une puissance installée totale de 20 GW.

b) le renforcement du **réseau européen d'interconnexion haute tension** permettant à une région d'Europe excédentaire d'exporter son surplus de production ou, si la région est déficitaire, d'importer l'énergie qui lui est nécessaire. Il existe une volonté (au moins au niveau du gouvernement des Etats européens) pour créer un super-réseau d'interconnexion, une « **plaque électrique européenne** », permettant les échanges d'énergie à l'échelle de l'Europe, échelle éventuellement étendue au Bassin méditerranéen et au Maghreb (projet solaire Desertec).

Il ne faut pas dissimuler que la réalisation d'un tel réseau de lignes à très haute tension se heurtera à des oppositions locales très déterminées.

Comment, par exemple, expliquer à un particulier résidant en France que la ligne à haute tension que l'on implante à proximité de son domicile servira à acheminer, à destination d'un autre pays du Nord de l'Europe, de l'électricité (même d'origine renouvelable !) produite par des éoliennes espagnoles ou par un parc solaire situé au Sahara ?

c) la troisième solution est le **stockage de l'énergie**.

Pour des installations de petites tailles (quelques kilowattheures) le stockage par batteries est tout à fait adapté.

Pour un stockage d'énergie plus important, seul aujourd'hui le stockage hydraulique réalisé par les centrales de type particulier, les « **Stations de Transfert d'Énergie par Pompage** » (les STEP), est capable de répondre correctement à l'ampleur des besoins.

Ces centrales (voir chapitre consacré à l'énergie hydraulique et aux STEP) pompent de l'eau depuis un bassin inférieur (ou un lac) et la restituent à un bassin supérieur lorsque l'offre d'énergie est supérieure à la demande et que l'énergie est bon marché (« **heures creuses** » de nuit par exemple). A l'inverse, lorsque la demande d'énergie augmente et qu'il devient nécessaire de faire appel à des moyens de production d'appoint onéreux, aux « **heures de pointe** », cette même eau est turbinée depuis le bassin supérieur vers le bassin inférieur aux fins de production d'électricité.

En France il existe déjà plus d'une dizaine de STEP ou de centrales réversibles (Grand-Maison dans les Alpes, Pragnères dans les Pyrénées, Montézier dans le Massif central, Revin dans les Ardennes, Lac Blanc-Lac Noir dans les Vosges...) mais ces installations sont déjà largement sollicitées pour répondre aux variations de la consommation lors des heures de pointe et ne sont pas disponibles pour le stockage de l'énergie éolienne.

La réalisation d'éventuelles nouvelles capacités de stockage hydraulique se heurtera aux mêmes difficultés que la réalisation des lignes à haute tension et des autres ouvrages hydrauliques terrestres. Difficultés générées par les conflits entre intérêts particuliers et l'intérêt général liées au choix des sites et à l'opposition que suscite en général l'impact des retenues sur les cours d'eau et sur l'environnement...etc.

d) il existe (au moins en théorie !) beaucoup d'autres moyens de « stocker » l'électricité produite par une éolienne. Ce stockage nécessite en général une conversion de l'électricité en une autre forme d'énergie, énergie potentielle, mécanique, chimique ou thermique.

Les modes de stockage actuellement les plus prometteurs, étudiés ou mis en œuvre au niveau de démonstrateurs ou d'unités pilotes sont :

- le stockage chimique par la production d'hydrogène à l'aide de différents procédés physico-chimiques. L'hydrogène est obtenu sous forme gazeuse puis comprimé, éventuellement liquéfié, ou stocké sous forme d'hydrures. L'hydrogène peut être utilisé dans une pile à combustible pour la production d'électricité ou être consommé incorporé au gaz naturel.

- le stockage mécanique par compression d'air que l'on stocke dans une cavité souterraine. Cet

air est par la suite détendu dans une turbine, ou un moteur. Le rendement de tels procédés est assez faible,

- les voitures électriques ! Il s'agit d'un stockage assez futuriste comme son principe le laisse entrevoir ! Si le nombre des voitures électriques croît de manière importante, on peut supposer que les batteries de traction (ce sont de grosses batteries) deviennent un moyen de stockage non négligeable à la condition, a) que chacun accepte que l'énergie emmagasinée dans les batteries de sa voiture puisse servir à alimenter le réseau, b) que la voiture soit inutilisée et, éventuellement, branchée au garage, c) que la batterie n'ait pas été déchargée par le réseau au moment où on souhaite se servir de sa voiture... Beaucoup de conditions à remplir. Nous n'en sommes sans doute pas encore à ce stade de partage communautaire !

7) En conclusion

a) Pour des raisons impératives de stabilité et de sécurité des réseaux électriques, les études et les simulations du fonctionnement de ces réseaux montrent que la production intermittente d'énergie éolienne peut difficilement satisfaire les besoins au-delà d'un certain pourcentage de sa participation à l'alimentation d'un réseau. Actuellement la limite à ne pas dépasser se situe entre 25 et 30% de la production électrique que les centres de production thermique, hydraulique ou nucléaire modulables capables de se substituer à l'éolien peuvent fournir.

Au-delà de cette limite, il faudra soit utiliser l'énergie éolienne produite en surplus à d'autres usages que celui de l'alimentation électrique du réseau général, soit disposer de moyens très importants de stockage. En dehors du stockage hydraulique (STEP), pour des raisons techniques ou économiques, les autres moyens de stockage n'en sont encore qu'au stade de la recherche fondamentale ou du prototype.

b) L'imagination et la créativité des hommes n'ayant pas de limites, de multiples manières d'utiliser ou de stocker l'électricité sont aujourd'hui proposées. Toutes, selon leurs promoteurs, sont évidemment plus astucieuses, plus économiques et plus soucieuses de l'environnement les unes que les autres.

Cependant, parmi les solutions proposées, ne subsisteront que les technologies capables de répondre aux multiples contraintes techniques d'un stockage de grande ampleur, que celles socialement et économiquement acceptables qui sauront également répondre aux exigences de plus en plus strictes imposées en matière d'environnement.

La sélection sera impitoyable et les solutions finalement retenues seront peu nombreuses.

Savoir utiliser autrement l'énergie éolienne intermittente et savoir la stocker sont les conditions sine qua non de son développement futur à grande échelle.



6 Structure support d'une éolienne off-shore 6 MW



5

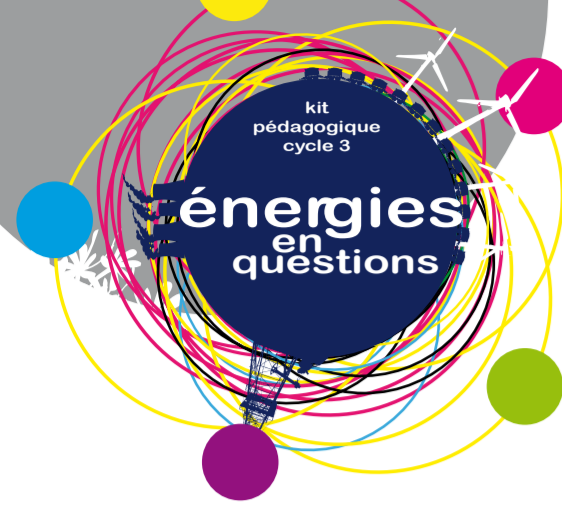
Les sites éoliens off-shore attribués en 2012

6) L'intermittence de la production éolienne et le stockage d'énergie

L'intermittence de la production d'électricité éolienne pose le problème de l'intégration de cette production dans le réseau national de production et de transport de l'électricité qui se doit d'assurer une fourniture continue et fiable répondant à la demande de la nation avec un taux de défaillance quasi nul.

A chaque instant, l'équilibre entre la production et la consommation doit être strictement maintenu et, si nécessaire, rapidement rétabli.

Il en va de la stabilité et donc de la sécurité du réseau électrique général (risque d'effondrement, de « blackout » généralisés) Le problème posé par l'intermittence de l'énergie éolienne provient du fait que l'électricité se stocke difficilement, tout au moins à grande échelle et dans des conditions économiques acceptables. Si un moyen de production fluctue de manière importante ou est défaillant, d'autres moyens de production doivent pouvoir lui être substitués sans délai afin de compenser l'écart qui s'est créé entre la demande et la production.



L'énergie solaire

1) L'ensoleillement et l'énergie reçue localement au sol

Avant de pénétrer dans l'atmosphère, la puissance du rayonnement qui nous parvient du Soleil est de 1 320 watt par mètre carré. Une partie de ce rayonnement, environ 30 %, est réfléchi vers l'espace par les nuages, les aérosols et l'atmosphère. Une autre partie, environ 20 %, est absorbée par les gaz de l'atmosphère (vapeur d'eau, gaz à effet de serre...). Finalement ce n'est que la moitié du rayonnement qui nous parvient jusqu'au sol. Soulignons que ces données ne sont que des valeurs moyennes annuelles mesurées pour l'ensemble de la planète.

Dans de bonnes conditions, correspondant à un ensoleillement optimum, la puissance du rayonnement arrivant au sol peut atteindre **un maximum de un kilowatt par mètre carré**.

Selon la latitude et selon les saisons, le rayonnement du Soleil arrive sur les sols de manière plus ou moins inclinée, sa puissance variera donc entre ce maximum de 1 kW/m² (Soleil à l'aplomb du lieu) et 0 (en hiver au-delà du cercle polaire), sa valeur moyenne calculée pour l'ensemble de la planète est de 342 W/m² (se reporter aux chapitres consacrés à la « Machinerie climatique » et à « L'effet de serre »).

1-1 L'ENSOLEILLEMENT

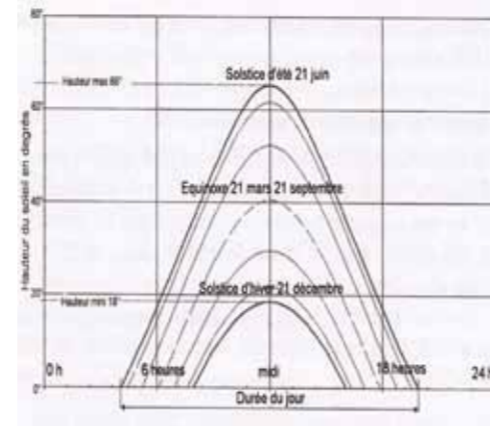
En un lieu, outre la latitude du lieu et la saison, l'énergie reçue varie au cours d'une journée en fonction de l'heure et des conditions atmosphériques, essentiellement de la nébulosité. Par pays ou par région des cartes mensuelles ou annuelles établissent, en heures, la durée moyenne de l'ensoleillement.

1-2 LES VARIATIONS DE L'ENSOLEILLEMENT AU COURS DE L'ANNÉE

L'énergie solaire récupérable annuellement en France est liée à la durée de l'ensoleillement moyen, elle est donnée par la figure 1.

Si on s'intéresse au jour le jour à l'énergie récupérable, celle-ci est essentiellement liée à la saison qui détermine la durée diurne de l'ensoleillement et la hauteur du Soleil par rapport à l'horizon en fonction de l'heure. (Figure 2).

Le diagramme de cette figure montre les variations de l'ensoleillement à Paris. Il indique en fonction des saisons (solstices et équinoxes) la durée journalière de l'ensoleillement et la hauteur du soleil par rapport à l'horizon (incidence du rayonnement). Entre les solstices, celui de l'été et celui de l'hiver, l'influence de l'incidence du rayonnement et de la durée du jour fait varier l'énergie reçue quotidiennement d'un facteur 4, voire 5 les jours de « sale temps ».



2 « Hauteur » du soleil à Paris en fonction de la saison et de l'heure

La hauteur s'exprime en degrés par rapport à l'horizontale du lieu. D'autres types de cartes à l'échelle du monde indiquent, en kilowattheure par mètre carré et sur l'année, la moyenne de l'énergie reçue quotidiennement au sol sous forme thermique (de chaleur).

3 Carte mondiale de l'énergie solaire moyenne reçue quotidiennement (en kWh / m²)

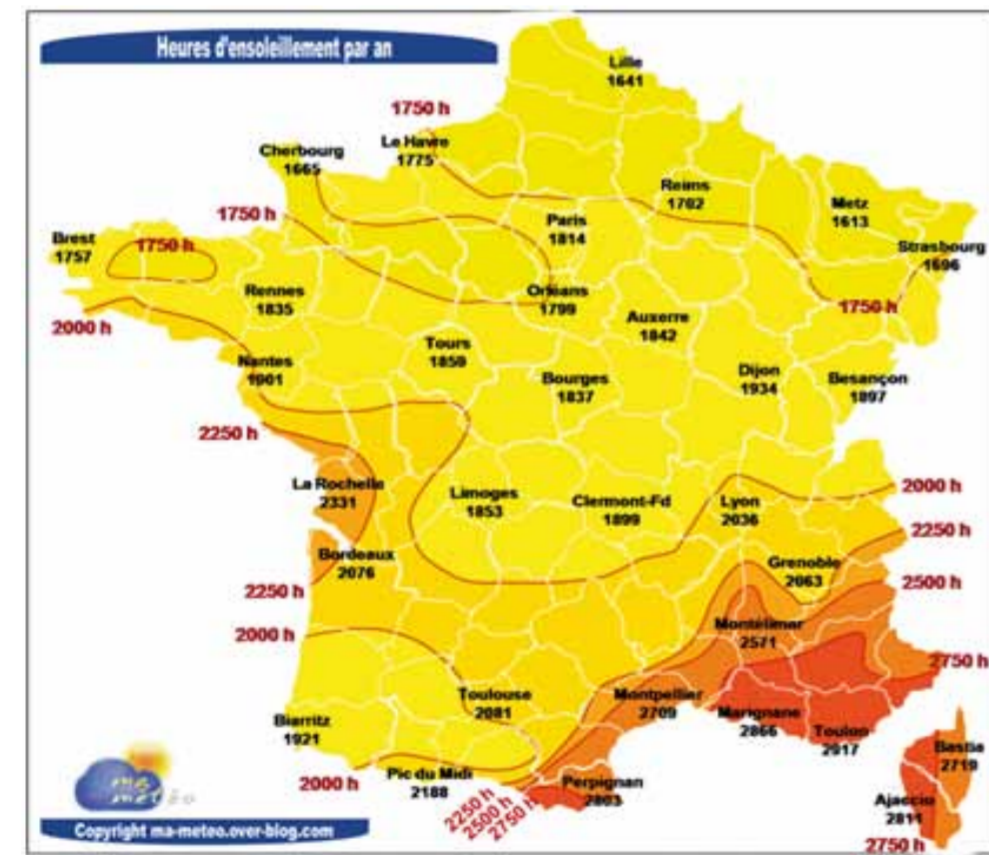
Une carte plus détaillée de l'Europe, figure 4, donne la valeur de l'énergie solaire récupérable sous forme thermique pour le chauffage et les usages sanitaires (chauffe-eau solaire). À Paris, sur une année, l'énergie thermique effectivement récupérable est d'environ 400 kWh / m².

4 Potentiel solaire thermique européen

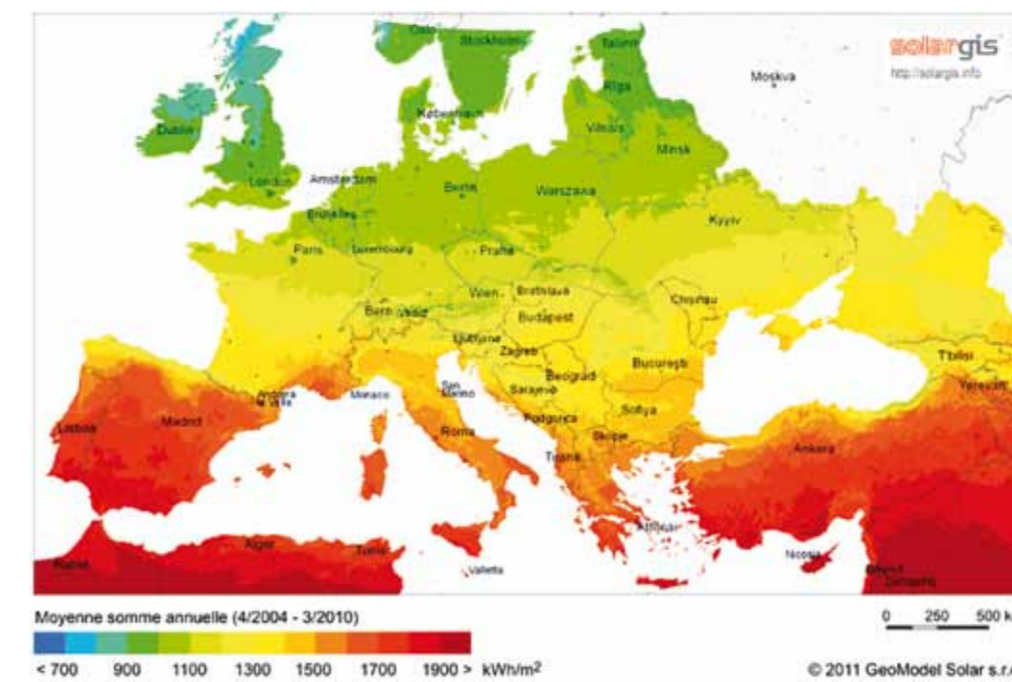
2) Le solaire thermique

Il existe essentiellement deux manières d'utiliser l'énergie qui nous parvient du Soleil à partir de l'irradiation directe (par opposition au rayonnement diffus),

- la première consiste à récupérer de la « **chaleur** », on parle de **solaire thermique**. Elle fait l'objet du présent paragraphe,
- la seconde consiste à convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique en utilisant l'effet photoélectrique, on parle de **solaire photovoltaïque** (paragraphe 3).



1 Carte de la durée annuelle de l'ensoleillement en France (en heures par an)



4 Potentiel solaire thermique européen

2-1 LES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES PLANS

Le principe de ces capteurs est simple (figure 5). Un corps absorbant, généralement mat et sombre, **convertit le rayonnement solaire émis sous forme de lumière en rayonnement infrarouge** qu'il transmet sous forme de chaleur à un fluide caloporteur.

En principe le fluide caloporteur pourrait être l'eau à chauffer mais, dans la plupart des chauffe-eau solaires, on préfère utiliser un **fluide caloporteur intermédiaire** afin d'éviter les inconvénients et les risques liés à l'eau : l'entartrage des circuits du capteur solaire et le gel. Ce fluide intermédiaire est généralement un glycol (antigel).

5 Principe d'un capteur thermique plan pour la fourniture d'eau chaude

Afin d'améliorer le rendement de ce type de panneaux, l'installation peut être complétée par une pompe de circulation, un ballon de stockage (accumulateur) et par un chauffage complémentaire asservi à système de contrôle et de régulation de la température (figure 7).

6 Installation de fourniture d'eau chaude sanitaire

En admettant que la consommation d'eau chaude sanitaire à 60 °C est en moyenne de 50 litres par jour et par personne, et en partant d'une eau à 15°C, la consommation annuelle d'énergie pour obtenir quotidiennement 50 litres d'eau à 60 °C serait de 950 kWh, soit l'équivalent de 0,082 tep. Pour la France l'eau chaude sanitaire représente une consommation d'énergie équivalente à 5 millions de tonnes de pétrole. Dans le futur les chauffe-eau solaires devraient logiquement couvrir une part de plus en plus importante du besoin.

Si le principe de l'ECS est séduisant, l'installation reste encore d'un coût élevé par rapport aux autres moyens de production d'eau chaude sanitaire (fuel, gaz ou électricité). Sa rentabilité reste malheureusement faible, surtout dans les régions du Nord de la France, et cela malgré les aides octroyées et les crédits d'impôts (retour sur investissement de l'ordre de 20 ans compte tenu du prix actuel du fuel).

7 Principe de chauffage solaire avec plancher chauffant

2-2 LE CHAUFFAGE SOLAIRE PAR CAPTEURS PLANS

En France, le chauffage des locaux est le premier poste de consommation d'énergie primaire. Avec une consommation de 60 millions de tonnes équivalent pétrole, il devance même les transports (50 Mtep). La consommation pour le chauffage se répartit entre les secteurs de l'habitat, 38 Mtep, et celui du tertiaire, 28 Mtep.

Cette consommation est la conséquence de la déperdition de chaleur des locaux et des bâtiments. La déperdition varie considérablement en fonction de l'habitat, dépassant annuellement 300 kWh/m²/an pour les logements anciens mal isolés pour descendre en dessous de 100 kWh/m²/an pour les logements récents ou rénovés correctement isolés.

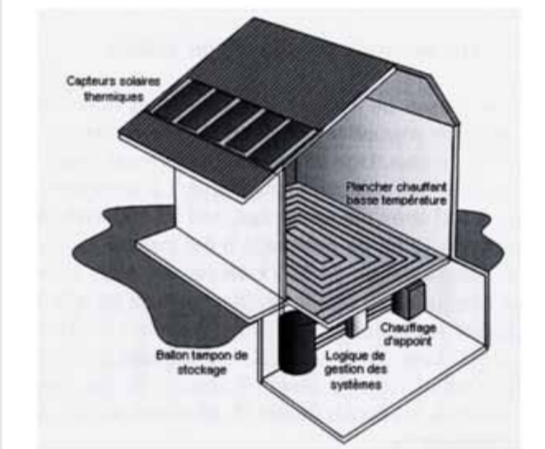
Indépendamment de la qualité de l'isolation des logements, les besoins en énergie pour le chauffage sont fonction d'un indicateur régional représentatif de la douceur ou de la rigueur du climat : les **Degrés Jours Unifiés** (DJU).

On obtient cet indicateur en calculant chaque jour la différence entre 18°C, (température de référence à partir de laquelle on admet qu'il devient nécessaire de chauffer) et la température moyenne extérieure. On obtient le « DJU » d'une région en additionnant toutes ces différences obtenues pendant la période de chauffage. Par exemple le DJU est de 2 700 à Strasbourg (climat plutôt froid), de 2 400 à Paris (plus tempéré) et de 1 465 à Nice (douceur hivernale). Cet indicateur sert aux chauffagistes pour dimensionner les installations de chauffage.

Le principe du chauffage solaire des locaux (figure 7) est le même que celui permettant d'obtenir l'eau chaude sanitaire avec cependant des différences notables :

- la surface des capteurs passe de 2 à 3 m² à une surface de 15 à 20 m²,
- pour faire face aux longues périodes hivernales avec peu ou pas de soleil, le chauffage solaire nécessite un chauffage régulé d'appoint et un ballon de stockage d'eau chaude d'assez grande capacité.

Une solution consiste à adjoindre au chauffage solaire une chaudière à bois (à granulés).



8 Principe du miroir parabolique

La crise explique sans doute une partie de cette tendance, mais la véritable raison de cette stagnation est à rechercher dans le report des aides de l'Union Européenne et gouvernementales vers le solaire photovoltaïque et dans l'effet d'aubaine que l'attrait des tarifs particulièrement élevés d'achat de l'électricité photovoltaïque a généré. La spéculation a souvent primé sur l'intérêt que l'on porte réellement à l'écologie.

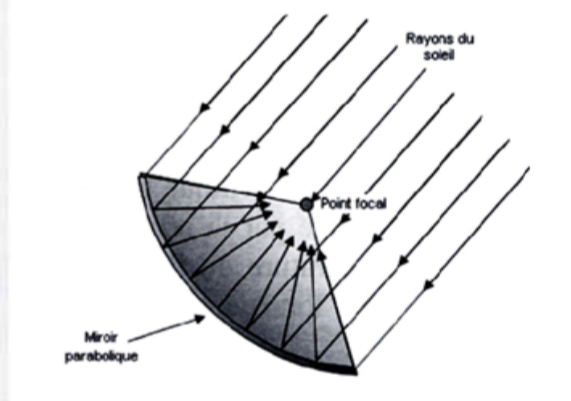
2-3 LE SOLAIRE THERMIQUE À CONCENTRATION, LES CAPTEURS PARABOLIQUES

2-3-1 Le principe du solaire thermique à concentration

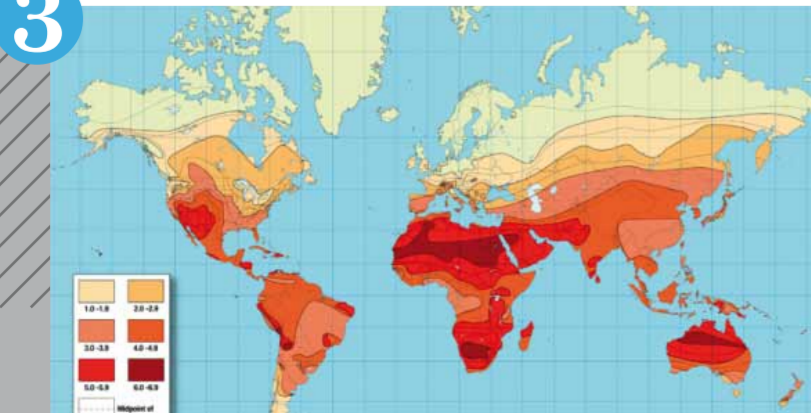
Il est basé sur le pouvoir des miroirs de forme parabolique de réfléchir les rayons lumineux arrivant selon l'axe de ce miroir vers un point, le point focal ou « **foyer** », où se concentre tout le rayonnement réfléchi (figure 8).

Au foyer du miroir il est possible d'atteindre des températures très élevées (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de degrés pour les très grands miroirs).

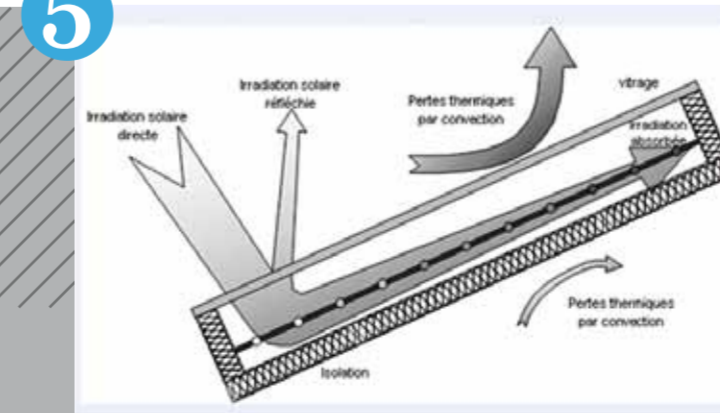
Un miroir parabolique fonctionne sur le même principe que les télescopes ou que les antennes paraboliques de réception de la télévision. Les antennes réceptrices de la télévision sont dirigées vers un satellite de communication et concentrent les ondes électromagnétiques émises par ce satellite vers un récepteur placé à leur foyer.



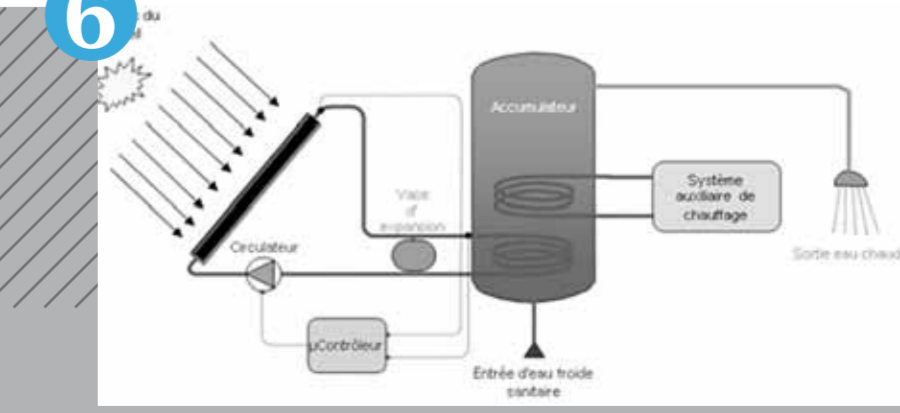
3 Carte mondiale de l'énergie solaire moyenne reçue quotidiennement (en kWh / m²)

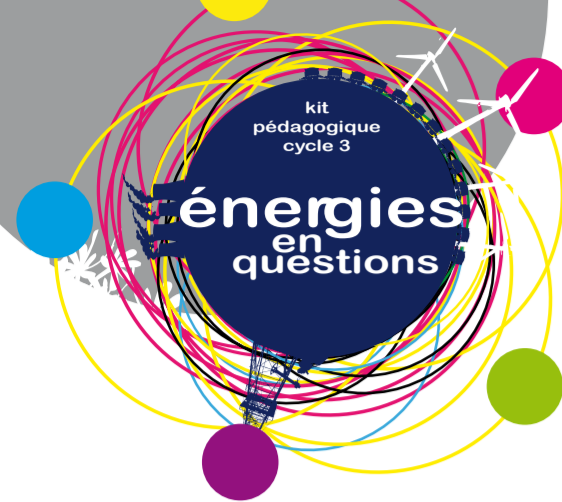


5 Principe d'un capteur thermique plan



6 Installation de fourniture d'eau chaude sanitaire

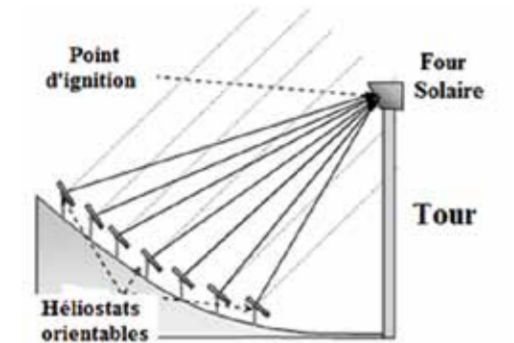




2-3-2 Les installations à héliostats avec tour

Le miroir de ces installations (figure 9) est en réalité formé d'une multitude de miroirs plans appelés « **héliostats** » disposés au sol de manière à former l'équivalent d'un grand miroir parabolique. Les héliostats concentrent les rayons vers le foyer, le « **four solaire** », situé en haut d'une tour.

Chaque héliostat est motorisé de manière à suivre la course du soleil et à toujours réfléchir ses rayons vers le foyer (le four).



9 Principe d'une installation à héliostats orientables et à tour

En 1970, à Odeillo en dans les Pyrénées Orientales françaises près de Fonds Romeux, Félix Trombe met au point un four solaire à héliostats d'une puissance de 1 mégawatt. Dix ans plus tard est lancé le projet de la centrale solaire Thémis.

La centrale est composée d'un champ de 200 héliostats concentrant les rayons vers un four situé en haut d'une tour. La chaleur récupérée chauffe un sel de sodium et de potassium fondu, ce sel caloporteur sert à la production de vapeur à 430°C et 50 bar qui actionne la turbine d'un groupe turboalternateur d'une puissance de 2,5 Mw électriques.

A cette époque, l'énergie en général étant encore bon marché, faute de rentabilité, l'expérimentation fut abandonnée et la centrale Thémis démantelée. Depuis lors, le champ d'héliostats a été repris et est géré par le Centre National de la Recherche Scientifique et sert à la recherche en astrophysique.

Le concept de centrale solaire à concentration avec champ d'héliostats ne fut jamais abandonné, il a été repris mais hélas... par d'autres, Espagnols, Allemands, Américains...

En France, le concept a (enfin !) été remis au goût du jour et un nouveau projet est à l'étude. Dans ce projet, nommé Pégase, le choix du fluide caloporteur s'est porté sur l'air comprimé chauffé à 800°C. Cet air alimente une turbine à gaz, dont la source froide est également alimentée en air. Le choix de l'air (au lieu de l'eau) pour les deux sources thermodynamiques nécessaires au fonctionnement de la turbine n'est pas dû au hasard, il est particulièrement adapté à des centrales destinées à être installées dans des contrées très ensoleillées mais totalement désertiques, dépourvue de toute ressource en eau.

+ La centrale solaire d'Odeillo

2-3-3 Les installations à tubes cylindro-paraboliques.

Le miroir, le « **concentrateur** » du rayonnement solaire, est constitué par une surface réfléchissante de section parabolique de grande longueur qui focalise et concentre les rayons sur un tube parallèle à cette surface (figures 10 et 11). Dans ce tube, placé au foyer de la parabole, circule le fluide caloporteur.

10 Capteur solaire cylindro-parabolique

Le tube à l'intérieur duquel le fluide caloporteur circule constitue également l'axe du miroir cylindro-parabolique autour duquel le miroir pivote afin de toujours être orienté de manière optimale par rapport au Soleil. Selon la surface du miroir, l'heure et la saison, la concentration de la lumière sur le tube, peut atteindre l'équivalent de la lumière émise par 60 à 400 Soleils !

Les centrales à concentrateur cylindro-parabolique sont plus simples et plus robustes que les centrales à champ d'héliostats dont le système électromécanique d'orientation des héliostats nécessite un entretien assez important. L'entretien et le nettoyage des miroirs paraboliques constitue une charge d'exploitation importante et nécessite une quantité d'eau non négligeable.

Les centrales à concentrateur cylindro-paraboliques sont souvent couplées à une centrale d'appoint au gaz afin d'obtenir une fourniture d'énergie constante et garantie quelles que soient les conditions météorologiques ou la saison.



11 Concentrateur cylindro-parabolique de la centrale d'Andasol.

La figure 11 présente un des 625 concentrateurs cylindro-paraboliques constituant la centrale solaire d'Andasol en Andalousie. La surface totale au sol des concentrateurs est de 51 hectares.

Le fluide caloporteur, 28 500 tonnes de sel fondu à 400°C stocké dans deux grands réservoirs de 36 m de diamètre et de 14 m de haut, sert à la production de vapeur entraînant un groupe turbo-alternateur.

L'énergie stockée pendant le jour dans ces réservoirs permet de faire fonctionner la centrale même en absence de soleil et une partie de la nuit. La centrale peut ainsi fonctionner 18 heures par jour en été et 10 heures par jour en hiver.

La puissance maximale (puissance crête) de la première unité de la centrale d'Andasol est de 50 MW électrique. Sa production annuelle est de 190 000 MWh (soit 0,37MWh par an et par m² de surface au sol) pour un fonctionnement annuel de 3 900 h équivalent pleine puissance.

L'insolation (et non l'ensoleillement) du sol de la centrale d'Andasol correspond à une énergie reçue de 2,2 MWh par an et par mètre carré.

Le rapport 6 entre l'énergie reçue (2,2 MWh / an / m²) et l'énergie produite (0,37 MWh / an / m² de surface au sol) illustre toute la difficulté de la captation et de la conversion en électricité d'une énergie diffuse. Le coût de production de cette centrale reste élevé : 250 € / MWh (racheté par le fournisseur national 300 € / MWh).

+ La centrale solaire andalouse d'Andasol à concentrateurs cylindro-parabolique

2-3-4 Les centrales à parabole.

Il s'agit de systèmes plus modestes en taille que les précédents mais très intéressants si l'on cherche à produire quelques dizaines de kW d'électricité de manière autonome sur des sites totalement isolés et désertiques privés d'eau. Ils sont constitués d'une parabole de plusieurs mètres de diamètre. A titre d'exemple, une parabole de 8,5 m de diamètre permet de recueillir une puissance thermique d'environ 50 kW et de fournir une puissance électrique de l'ordre de 10 kW.

Un mécanisme de précision de suivi de la trajectoire du soleil conduit à l'obtention de facteurs de concentration élevés compris entre 700 et 1 000. Il est alors possible d'atteindre des températures de source chaude de 700°C, ou plus, capables d'entraîner un « moteur thermodynamique » à air chaud (moteur Stirling).

Ces systèmes, totalement autonomes, restent cependant coûteux, tant en investissement qu'en maintenance. Ils sont assez fragiles face aux intempéries (tornades, cyclones...).

2-4 LE DÉVELOPPEMENT DU SOLAIRE THERMIQUE.

En 2011 la puissance installée des centrales solaires thermiques, « **thermodynamiques** », dans les pays à fort ensoleillement était de 40 000 MW. Leur production atteignant 10 TWh (milliards de kWh). Il est prévu que la puissance installée de ces centrales double dans la décennie à venir.

Le solaire thermique devrait bénéficier de recherches technologiques destinées à améliorer ses performances et à en réduire les coûts de production.

Il doit être souligné que son développement se heurte à la concurrence du solaire photovoltaïque du fait des aides préférentiellement accordées aujourd'hui à ce dernier au travers des conditions particulièrement avantageuses d'installation (aides et subventions) et des obligations d'achat de l'électricité photovoltaïque.

Notons également que, du fait de l'importance du volume des fluides caloporteurs à stocker (sel fondu ou huiles), les installations solaires thermiques sont « classées à risque » conformément à la réglementation européenne mise en place suite à l'accident de Seveso.

Ce classement ne rend pas toujours ce type de stockage compatible avec les plans d'urbanisme, il a déjà conduit à l'abandon de certains projets.

Tout est fait dans l'esprit initial de cette utilisation du photovoltaïque, (figure 12), l'alliance en zone désertique du photoélectrique et du dromadaire. Le premier assure la fourniture en électricité d'un réfrigérateur destiné à la conservation des vaccins, le second assure le transport !



12 Photoélectricité et transport réfrigéré de vaccins dans le désert...

3-2 LE DÉVELOPPEMENT DU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

A travers le monde, le solaire photovoltaïque connaît un développement rapide, en Europe son développement est même fulgurant.

13 Puissance installée en Europe (en GW crête)

En 2010, l'Europe possédait plus des trois quarts de la puissance photoélectrique installée mondiale, soit 23 000 MWcrête (MWc). La puissance crête est la puissance maximale que peut fournir une installation photoélectrique dans les conditions optimales d'ensoleillement, soit lorsque le soleil du midi est situé à l'aplomb du capteur photoélectrique.

L'Allemagne, bien que n'étant pas le pays le plus ensoleillé d'Europe, dispose de la puissance installée la plus importante, 9 800 MWc. Elle est suivie de l'Espagne 4 500 MWc, de l'Italie...

La production cumulée européenne avoisine les 20 TWh (milliards de kWh).

En France le développement du photovoltaïque fut plus tardif qu'ailleurs en Europe occidentale, ce n'est qu'à partir de 2005 que le rythme du développement s'est accéléré. De 2005 à 2010 on assiste à d'un doublement annuel de la puissance installée, ce qui est considérable. Le Grenelle de l'environnement envisage pour 2020 une puissance installée de 5 GW crête (soit une production d'environ 6TWh).

Cette croissance extraordinairement rapide du photovoltaïque repose actuellement et essentiellement sur les incitations financières et les aides que la plupart des gouvernements européens ont consenties afin d'aider à son développement. Ces incitations, par le passé particulièrement attractives et garanties sur le long terme, ont inévitablement créé un effet d'aubaine et la formation de bulles spéculatives.

Actuellement, face à l'ampleur et à la durée de la crise financière, les gouvernements européens, l'Espagne, l'Allemagne, l'Italie, et plus récemment la France, ont été contraints de réviser, parfois de manière drastique, leurs politiques d'incitation jugées trop onéreuses, d'autant que ces incitations n'ont pas permis de développer une industrie européenne compétitive capable de rivaliser avec les matériels massivement importés à bas coût du Sud-Est Asiatique.

Compte tenu de sa situation économique, le coup d'arrêt a particulièrement été violent en Espagne incapable de supporter le coût (10 milliards d'€ annuels) des aides, subventions et obligations d'achat en soutien au photovoltaïque.

En février 2011 le gouvernement français a publié un bilan montrant que, pour les installations déjà réalisées avant la révision des conditions de l'obligation d'achat par EDF, le coût engagé par les seuls contrats déjà passés était de 2,5 milliards d'€ par an. Ce coût est supporté par les usagers au travers d'une taxe (la Contribution au Service Public de l'Électricité) que chacun acquitte sur sa facture d'électricité en fonction de sa consommation. Sur 20 ans, durée de ces premiers contrats, le total du coût s'élève à 50 Milliards d'€.

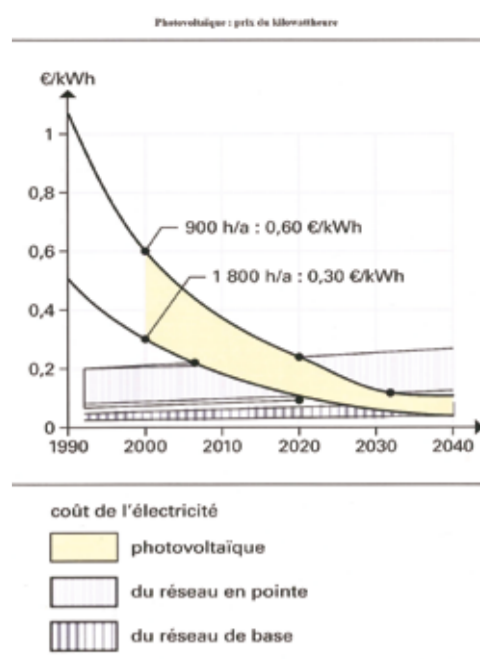
Le Gouvernement français a décidé de diminuer le montant des aides et des subventions et de réviser périodiquement le prix auquel EDF était tenu d'acheter l'électricité photovoltaïque aux producteurs.

3-3 EVOLUTION ET COÛT PRÉVISIBLES DE LA PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE

Après une décennie atypique fortement soutenue par des incitations financières et fiscales, le développement futur du photovoltaïque sera essentiellement fonction de l'évolution du coût des composants (silicium et dopants) entrant dans la fabrication des cellules, du coût des installations et de la compétitivité de la production photovoltaïque par rapport à l'énergie éolienne et aux moyens de production conventionnels.

Sur un plan économique, la figure 14 montre, pour différents moyens de production, l'évolution prévisible jusqu'en 2040 du coût de la production d'électricité exprimé en €/kWh

- les hachures noires sont représentatives du coût d'une production de base à partir de moyens conventionnels, centrales thermiques (gaz, charbon), ou nucléaires et hydrauliques,
- hachures bleu-grises sont représentatives du coût d'une production fournie par des moyens de production mis en œuvre pour satisfaire aux demandes de pointe turbine à gaz...),
- en jaune, le coût de l'électricité fournie par le photovoltaïque, la zone correspondant à des ensoleillements différents compris entre 900 et 1800 heures d'ensoleillement par an.



14 Evolution des coûts prévisibles de production

3-4 CONSTITUTION DES PANNEAUX SOLAIRES

Plusieurs **cellules photovoltaïques élémentaires** (généralement 36) sont montées en série pour constituer un module. Ce module fournit un **courant continu** sous une tension et une intensité relativement faibles (21,6V et 2 A). Pour constituer un panneau solaire, tel que celui que l'on voit couramment sur les toitures, il est nécessaire de grouper plusieurs **modules élémentaires en files** (montage en série pour augmenter la tension), et de disposer **plusieurs files en parallèle** (montage en parallèle pour augmenter l'intensité).

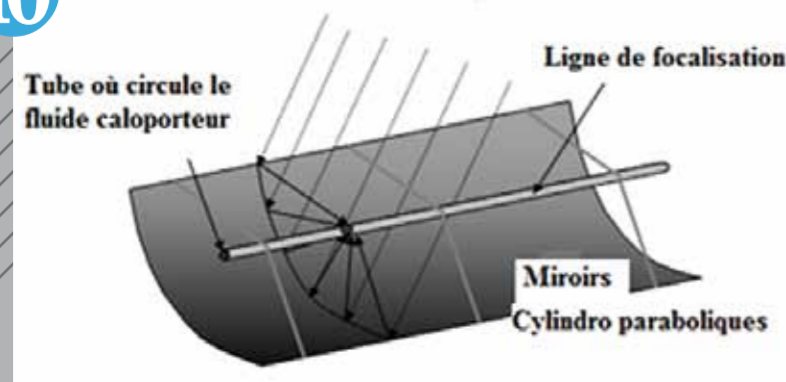
Le panneau sur la figure 15 comprend deux files de trois modules, chaque module étant lui-même composé de 36 cellules élémentaires en série.

15 Les principaux constituants d'une installation photovoltaïque classique

Avant d'être injecté sur le réseau général, un « **onduleur** » transforme le courant continu produit par l'ensemble des modules (assemblés comme indiqué ci-dessus) en courant alternatif de fréquence 50 hertz sous une tension légèrement supérieure à 220 V.

Le couplage au réseau général s'effectue à l'aide d'un dispositif assurant la synchronisation entre la phase du réseau et celle de l'installation de production photovoltaïque.

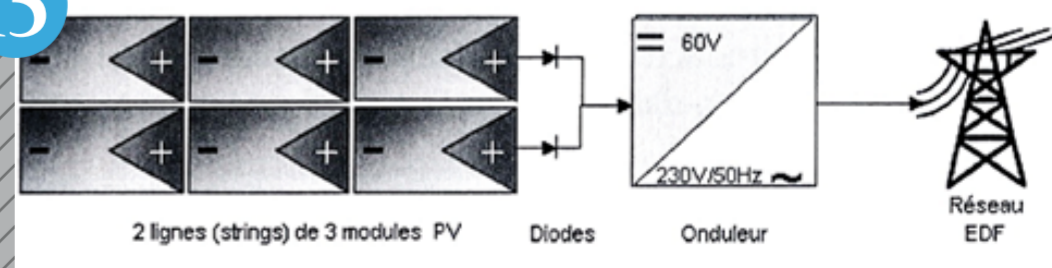
10 Capteur solaire cylindro-parabolique

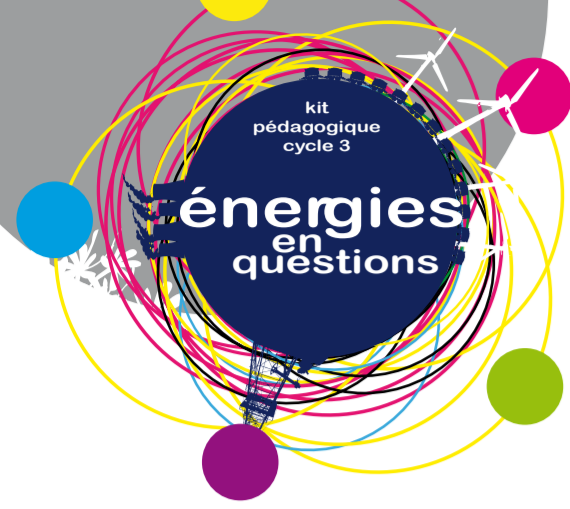


13 Puissance installée en Europe (en MWcrête)



15 Les principaux constituants d'une installation photovoltaïque classique





L'énergie géothermique, les pompes à chaleur

1) Un peu de géologie...

1-1 LE FLUX DE CHALEUR

Le flux de chaleur qui nous parvient de l'intérieur du globe terrestre correspond à la dissipation vers l'espace de l'énergie accumulée au sein de notre planète.

+ Pour en savoir plus
Chaleur interne de la terre, tectonique des plaques

Ce flux de chaleur est la manifestation calme et régulière de la dissipation d'énergie provenant du centre de la Terre, les autres manifestations, les **séismes** ou les **éruptions volcaniques**, étant plus brutales voire cataclysmiques. La source d'énergie de toutes ces manifestations est cependant la même, la chaleur accumulée pendant la formation de la Terre, la dite « **chaleur d'accrétion** » et la chaleur dégagée en permanence par la **radioactivité naturelle** des roches renfermant des éléments radioactifs (essentiellement les uraniums et leurs descendants ainsi que le potassium 40). Sur l'ensemble de la surface de la Terre, le flux de chaleur dissipé est en moyenne de 60 milliwatt par mètre carré. Cette faible valeur rend ce flux de chaleur parfaitement imperceptible au commun des mortels. Si on calcule le total de l'énergie dissipée par l'ensemble de la surface du globe, la puissance de ce flux apparaît néanmoins considérable : 42 milliards de kW... soit l'équivalent de 42 000 des plus grosses centrales de 1 000 MW électriques actuellement en fonctionnement. Bien que considérable, cette énergie ne représente cependant que deux dix millièmes de l'énergie que nous recevons du Soleil...

1-2 LES ZONES FAVORABLES À LA GÉOTHERMIE

Dans certaines zones de l'écorce terrestre, ce flux de chaleur présente des anomalies :
- au fond des océans où la croûte océanique est plus mince que la croûte continentale, le flux de chaleur dissipé y est plus élevé que sur les continents (en moyenne 67mW/m² au lieu de 54mW/m²).
- le long des dorsales océaniques (figure 1), sur une longueur cumulée de 60 000 km où la croûte océanique se forme à partir des volcans sous-marins (en vert sur la figure 1), le flux moyen peut atteindre jusqu'à 120 mW/m²,

- dans les zones volcaniques, que le volcanisme soit récent et actif (Islande, ceinture de Feu du Pacifique, Italie...) ou ancien et (apparemment) inactif (Massif Central, Alsace...),
- dans certains bassins sédimentaires dont, en France, les bassins aquitains et parisiens.

+ Pour en savoir plus
L'origine du flux d'énergie émanant de la Terre

Comment la chaleur interne de la Terre est-elle dissipée à sa surface ?

Le transfert vers la surface puis la dissipation de la chaleur accumulée et produite à l'intérieur de la Terre vers sa surface, s'effectue selon deux modes :

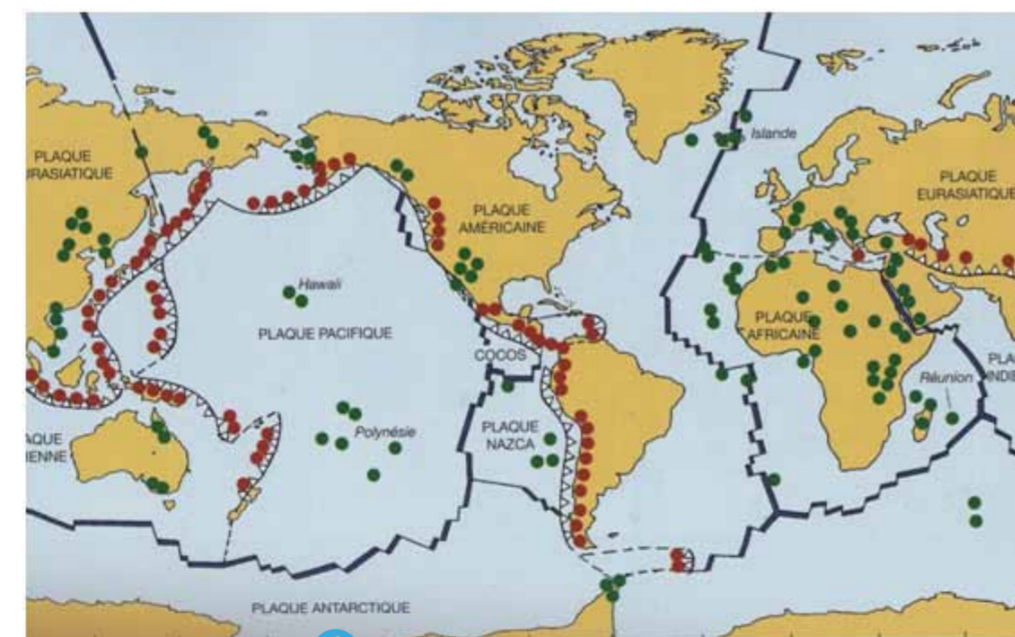
2 Les mouvements de convection internes au globe terrestre

- le premier est un transfert **par conduction** (transfert d'énergie de proche en proche). Cependant, les roches conduisent peu et mal la chaleur, le transfert par conduction n'est donc pas, et de loin, le mode de transfert principal de la chaleur.

- le second mode de transfert, le principal, s'effectue de manière dynamique, **par convection**, c'est-à-dire par l'intermédiaire de mouvements de matière. Aussi étrange que cela puisse paraître à première vue, c'est essentiellement de cette manière que la chaleur transite depuis le centre de la Terre vers sa surface !

Sous l'effet des énormes pressions et de la température élevée, sous des apparences solides, le manteau est en fait une matière malléable, « plastique », qui se déforme à l'échelle des temps géologiques, tout comme l'acier dans un laminoir. Les matériaux du manteau se déplacent sous l'effet de la poussée d'Archimède engendrée par les différences de température existant entre les différentes zones du manteau et donc par les différences de densité entre les matériaux de ces zones.

Au sein du manteau, (figure 2) d'immenses mouvements cycliques de convection en forme de boucles se créent.



1 Plaques formant la croûte terrestre

Ils remontent des matériaux chauds (les plus légers) depuis le centre vers la surface, tandis que les matériaux qui se sont refroidis en surface (les plus denses), plongent de nouveau vers le centre de la terre.

Les grands mouvements de convection au sein du manteau se répercutent jusqu'aux couches les plus externes de la Terre. La couche la plus externe, la croûte terrestre (la lithosphère), constituée par les continents et les fonds océaniques, va être sollicitée et entraînée par ces mouvements. Contrairement au manteau plastique, déformable, la lithosphère est froide et rigide. Sous l'effet des courants de convection elle se disloque formant un puzzle (figure 1) dont chaque pièce appelée « plaque » se déplace relativement à ses voisines avec des vitesses variant de 2 à 20cm / an qui est le maximum de vitesse observé entre les plaques Pacifique et Nazca au large de l'Amérique du Sud. Deux cas se présentent (figure 2) :

- soit les plaques s'écartent l'une de l'autre : à leur frontière, le magma remonte des profondeurs et s'épanche en créant des chaînes de volcans sous-marins, ce sont les dorsales océaniques. C'est ainsi, à partir des matériaux remontés par les courants de convection, que se forme le fond des océans lors de leur ouverture. Exemples d'ouverture, l'ouverture de l'Atlantique Sud et Nord entre l'Afrique et le continent Sud-Américain, entre le continent Nord-Américain et l'Europe ou l'ouverture, également en cours, de la Mer Rouge entre l'Afrique et la plaque Arabique.

- soit les plaques se télescopent, l'une des plaques, la plus dense, plongeant sous l'autre. Par exemple la plaque océanique Nazca plongeant sous le continent Sud-Américain. Ces zones de confrontation, de subduction, sont le siège de violents séismes (Japon, Indonésie, Chili...) et de manifestations volcaniques explosives telles l'éruption des volcans d'arc de la ceinture de feu du Pacifique (volcans en rouge sur la figure 1).

C'est dans ces zones de confrontation de plaques que se forment les jeunes chaînes de montagnes, les Andes, les Rocheuses, l'Himalaya... les Alpes résultent quant à elles de la confrontation entre les plaques Afrique et Eurasie.

+ Chaleur interne de la terre, tectonique des plaques

2) L'énergie géothermique

Par convention on distinguera deux grands types de géothermies :

- la **géothermie de haute énergie** qui utilise des fluides dont la température est comprise entre 150 et 350°C.

Après séparation de l'eau et de la vapeur, la vapeur est directement utilisée dans une turbine pour produire de l'électricité.

- la **géothermie de moyenne et de basse énergie**, utilisant des fluides dont, les températures sont comprises entre 100 et 150°C et en dessous de 100°C pour la géothermie basse énergie.

Pour ces deux derniers types de géothermie on utilise directement la chaleur fournie par les fluides pour le chauffage urbain.

Au niveau mondial, l'apport de la géothermie est relativement modeste. La géothermie représente 0,3% de la production mondiale d'électricité (70 TWh sur les 20 000 TWh produits annuellement dans le monde) et moins de 0,1 % de la fourniture de chaleur directe (4 Mtep). Cette participation aujourd'hui modeste ne préfigure en rien de l'intérêt que la géothermie, associée ou non à des pompes à chaleur, présentera très certainement dans le futur pour le chauffage collectif dans les régions particulièrement favorables. La figure 3 présente la carte du potentiel géothermique profond de l'Europe de l'Ouest. Ce potentiel est directement lié à la température des gisements.

3 Potentiel géothermique profond de l'Europe occidentale et méridionale

2-1 LA GÉOTHERMIE HAUTE ÉNERGIE

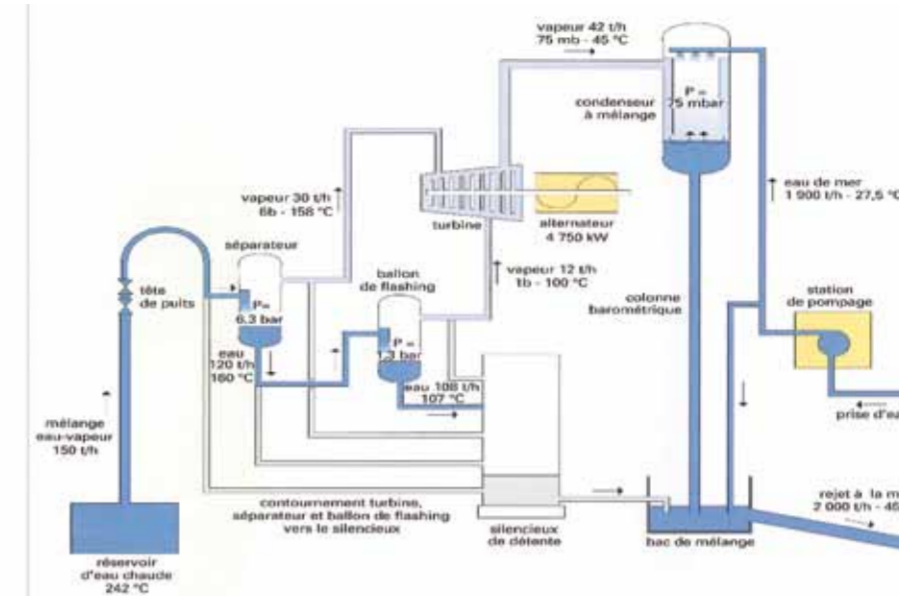
On la trouve à proximité de toutes les zones volcaniques actives, Islande, Italie (Larderello)... en Guadeloupe, à Bouillante au pied de la Soufrière... etc.

La figure 4 illustre le principe de fonctionnement des centrales géothermiques. L'eau pressurisée, ou plus généralement un mélange d'eau et de vapeur remontant d'un réservoir souterrain naturel est captée à l'aide d'un ou de plusieurs puits forés.

Le mélange eau-vapeur est tout d'abord envoyé dans un **séparateur** où il se dépressurise et « éclate » ce qui permet de séparer l'eau de la vapeur.

La vapeur (saturée) sortant du séparateur est envoyée vers une turbine qu'elle actionne, la turbine entraîne un alternateur générant de l'électricité. Comme dans toutes les centrales thermiques, à la sortie de la turbine la vapeur est condensée à l'aide d'une source froide.

L'eau obtenue après condensation de la vapeur à la sortie de la turbine est mélangée avec l'eau chaude en provenance du séparateur et le mélange des deux eaux est réinjectée dans le sous-sol afin de réalimenter la nappe. La réinjection des fluides captés pérennise l'alimentation de la centrale. Les puits par lesquels l'eau est réinjectée sont évidemment situés en des points éloignés des puits de captage.



4 La centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe

Pour la géothermie haute énergie, les investissements sont élevés (plusieurs forages sont nécessaires) et les rendements sont faibles compte tenu des températures modestes et de la qualité de la vapeur (vapeur saturée).

Au monde, les zones de géothermie haute énergie les plus exploitées sont situées en Californie (au total 350 puits pour une puissance de 2 000 MW électriques), en Italie (centrale de Larderello de 400 MW électriques) et bien évidemment en Islande.

La puissance totale du site de Bouillante est de 15 MW électriques. Les forages de captation s'étagent entre 300 et 1000 m de profondeur. Le débit total des puits pour l'ensemble des tranches est de 450 t/h dont, après séparation, 90 tonnes de vapeur à 160°C et 6 bars envoyées vers la turbine et 360 tonnes d'eau provenant du séparateur. L'eau de mer nécessaire à la condensation de la vapeur s'échappant de la turbine et l'eau provenant du séparateur sont mélangées et rejetées en mer, soit 6000 t/h à 45°C. L'alimentation naturelle de la nappe étant suffisante, il n'y a pas lieu de la réalimenter.

+ La centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe

2-2 LA GÉOTHERMIE DE MOYENNE ÉNERGIE (100-150°C)

A ces températures comprises entre 100 et 150 °C, la production d'électricité est encore théoriquement possible à la condition d'utiliser un fluide intermédiaire, ammoniaque, isobutane... dont la température d'ébullition à la pression atmosphérique est très inférieure à celle de l'eau chaude en provenance de la nappe aquifère. Dans ces installations, l'eau chaude extraite du sous-sol échange ses calories avec le fluide intermédiaire qu'elle vaporise. La vapeur produite est turbinée tandis que l'eau est réinjectée dans la nappe aquifère.

Ce type d'installations est complexe, les rendements obtenus sont peu élevés et les coûts de production importants.

2-3 LA GÉOTHERMIE EN « ROCHES SÈCHES »

On désigne sous le vocable de roches sèches, des roches chaudes au sein desquelles l'eau est absente.

En injectant de l'eau à haute pression, il est possible de créer (ou de recréer) par fracturation hydraulique de la roche des réseaux de circulation d'eau et de produire une quantité d'eau chaude pressurisée suffisante pour assurer le fonctionnement d'une centrale ou le chauffage d'un ensemble urbain.

Un projet européen de géothermie en roches sèches profondes est en cours d'expérimentation à Soultz en Alsace. Un forage profond (5 000 m) permet d'injecter 100 litres d'eau par seconde dans une zone granitique à 200 °C. L'eau est récupérée à 180°C et alimente, après éclatement et séparation, une centrale dont la puissance est de 1,5 MW électrique. Le rendement global n'est que de 12%.

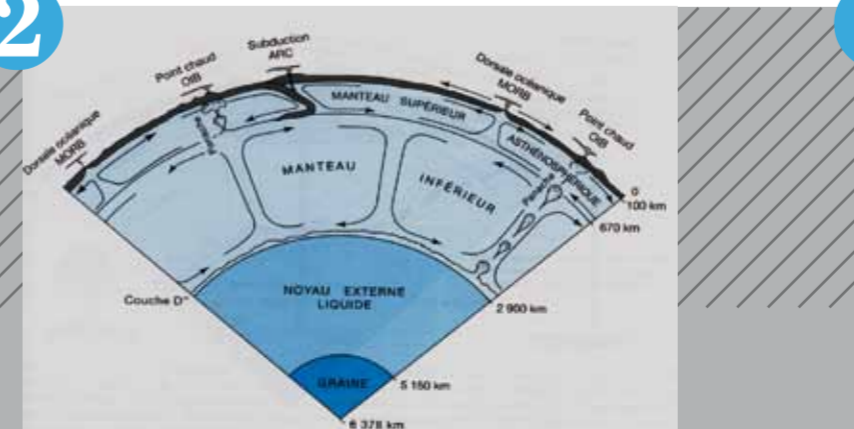
2-3 LA GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

Elle correspond à un domaine de températures comprises entre 50, parfois moins, et 100°C. Ce domaine est celui que l'on exploite classiquement dans les réseaux de chaleur pour le chauffage urbain et pour certaines applications industrielles, telles que le séchage.

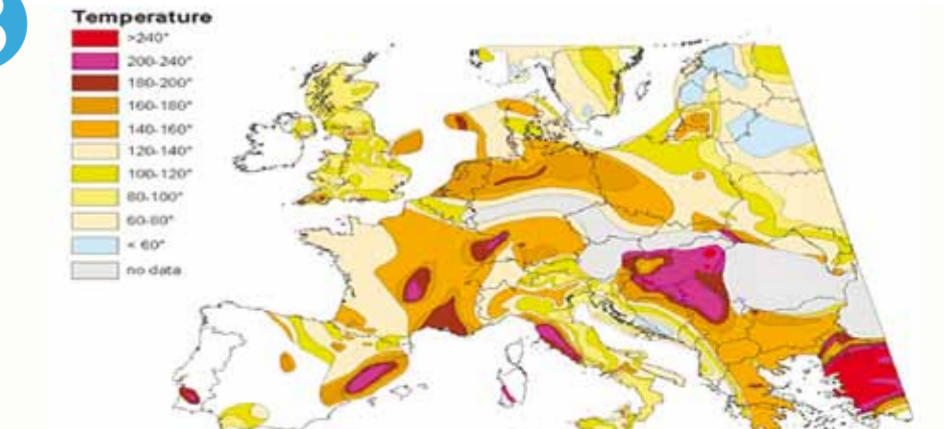
Contrairement aux deux autres types de géothermie, elle ne nécessite pas la présence dans le sous-sol de points chauds particuliers (présence de magmas, de volcanisme ou de failles...). En effet, dans une formation sédimentaire normale, à 1800 m de profondeur la température moyenne d'une nappe aquifère atteint 70°C ce qui s'avère suffisant pour rentabiliser un projet de chauffage collectif.

Cependant l'inconvénient de ces eaux est qu'elles sont chargées en sels et en impuretés ce qui les rend corrosives. Elles ne sont donc généralement pas utilisables directement et ne peuvent pas être injectées telles quelles dans un réseau de distribution de chaleur.

2 Les mouvements de convection internes au globe terrestre



3 Potentiel géothermique profond de l'Europe occidentale et méridionale



+ L'origine du flux d'énergie émanant de la Terre

A l'intérieur du globe il existe deux sources de chaleur réparties depuis le noyau central de la Terre jusqu'à la « **lithosphère** », la croûte superficielle sur laquelle nous vivons. La puissance totale dissipée par ces deux sources à la surface du globe de 42 milliards de kW.

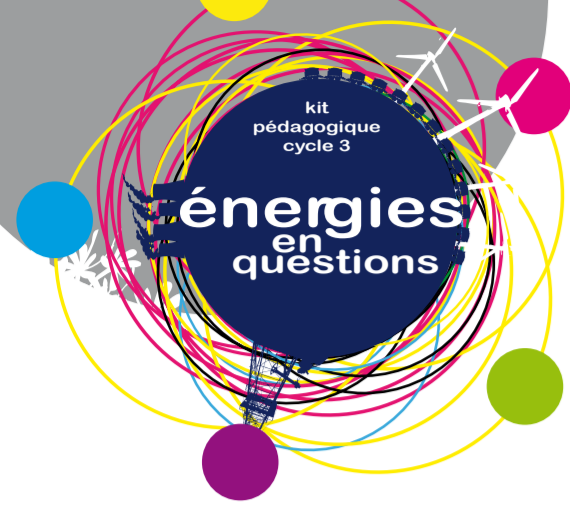
a) La source principale de chaleur participe aux deux tiers à l'énergie totale dissipée. La chaleur provient essentiellement de la désintégration en chaîne d'éléments radioactifs naturels de longue période encore présents dans les roches : les uraniums 235 et

238. En se désintégrant ces éléments (les « pères ») produisent des éléments eux-mêmes radioactifs (les « fils ») qui sont eux-mêmes producteurs de chaleur lorsqu'ils se désintègrent à leur tour en protactinium, actinium, radium, francium, radon, astate, polonium et bismuth. Par désintégrations successives les chaînes de désintégration radioactives aboutissent finalement toutes à la formation d'un des isotopes stables du plomb.

A ces deux éléments « pères », uranium et thorium, il convient d'ajouter le potassium 40 encore présent sur

Terre. Avec une période de 1,25 milliard d'années, il se désintègre en calcium stable. Un tiers de la chaleur provenant de la désintégration radioactive est produite dans la croûte terrestre, la lithosphère, qui constitue la couche la plus mince et la plus externe du globe (entre quelques kilomètres d'épaisseur au fond des océans et jusqu'à 100 km sous les continents) où ces éléments radioactifs se sont préférentiellement concentrés. Les deux autres tiers sont produits dans le manteau, entre 100 et 2 900 km de profondeur.

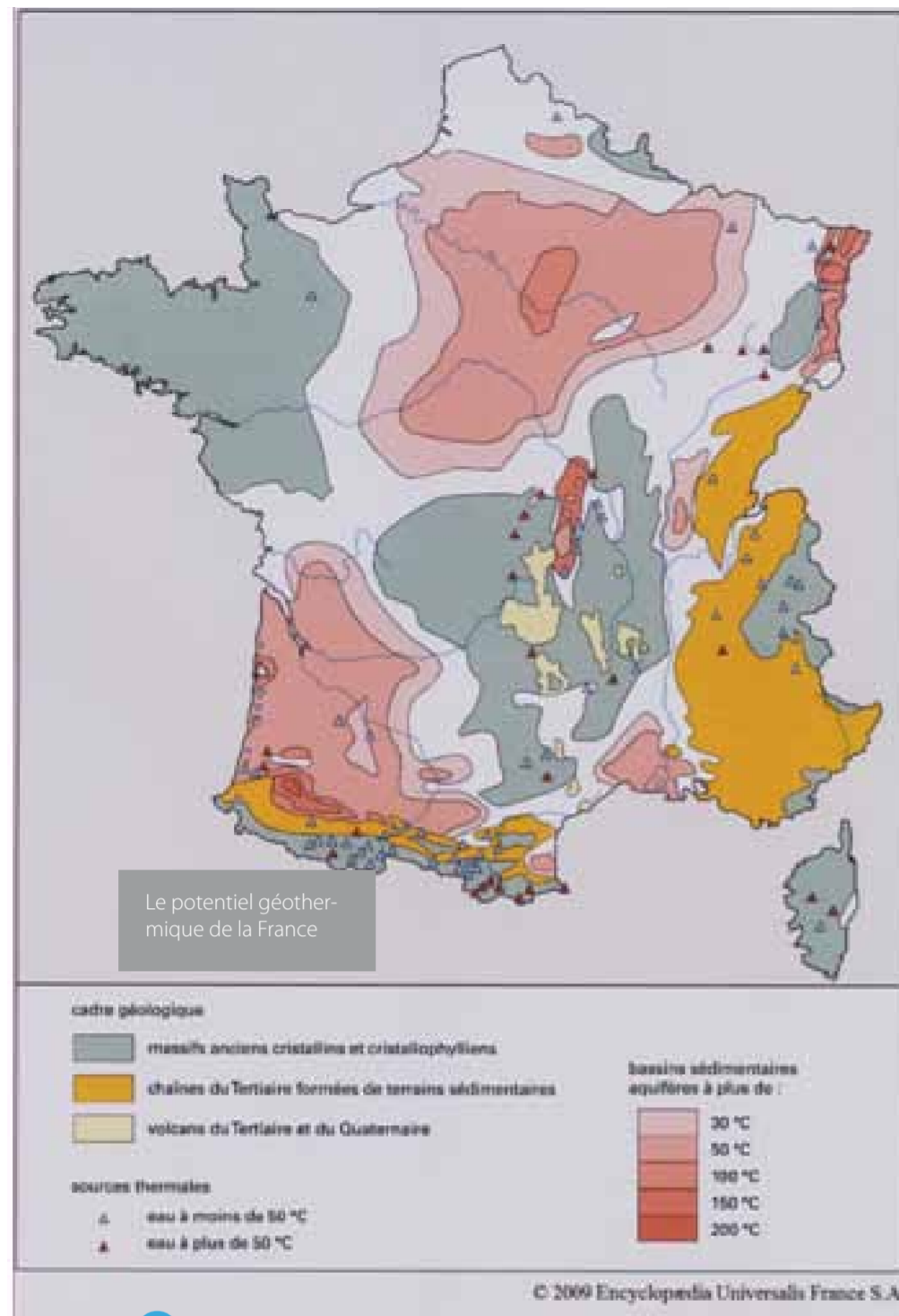
b) La seconde source de chaleur participe pour un tiers à la chaleur dissipée par la Terre. Cette énergie a pour origine la chaleur primitive, la chaleur d'accrétion, accumulée pendant la phase de formation de la Terre. Elle correspond à l'énergie cinétique des divers éléments (astéroïdes, météorites...) qui sont entrés en collision, ou qui ont bombardé la Terre, pour finalement former la planète telle que nous la connaissons. Cette énergie cinétique a été emmagasinée sous forme de chaleur dont une partie subsiste encore dans le noyau externe liquide de la Terre et l'autre partie dans le manteau terrestre (figure 2).



Les crises pétrolières des années 1970 ont été à l'origine du lancement d'une centaine d'installations de chauffage collectif notamment en région parisienne. Dans le Bassin parisien, la source de chaleur est le bassin dit du Dogger qui s'étend sur 15 000 km² et offre des eaux dont la température oscille entre 55 et 85°C. Dans les années qui ont suivi les chocs pétroliers, en raison de la baisse du coût de l'énergie d'une part et des problèmes techniques rencontrés du fait de la corrosion des réseaux de captage et de réinjection d'autre part, il ne reste plus qu'une trentaine de ces installations en service. Aujourd'hui, au total, ces installations ne représentent plus que l'équivalent des besoins en chaleur de 140 000 logements. La principale installation est celle de Chevilly-Larue et de l'Hajie les Roses où elle fournit des 2/3 des besoins en chaleur de 9 800 logements. Compte tenu de l'évolution récente, et sans doute irréversible, du coût de l'énergie et des progrès technologiques (dont la tenue des matériaux à la corrosion), la géothermie basse énergie devrait prochainement connaître un nouvel essor, notamment dans les bassins sédimentaires, Bassin Parisien, Bassin Aquitain, Alsace...



Le potentiel géothermique basse énergie en France



5 Le potentiel géothermique de la France

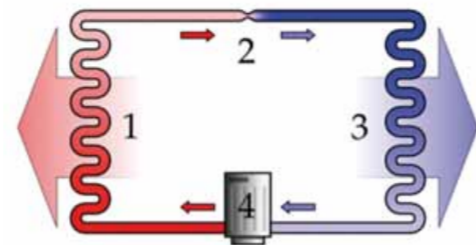
3) Les pompes à chaleur

3-1 LE PRINCIPE

Une définition simpliste (mais néanmoins juste !) de la pompe à chaleur est la suivante : une pompe à chaleur est tout simplement un réfrigérateur dont la partie « utile » n'est plus la partie froide (à laquelle on s'intéresse pour conserver ou refroidir les aliments dans le cas du réfrigérateur) mais la partie chaude du réfrigérateur (celle située à l'extérieur et généralement à l'arrière) que l'on utilise ici pour chauffer un logement ! Dans un réfrigérateur on « pompe » les calories du compartiment intérieur froid que l'on rejette sous forme de chaleur dans l'environnement (l'environnement étant souvent l'intérieur d'un logement... que l'on chauffe !). Dans une pompe à chaleur (figure 6) on « pompe » les calories dans l'environnement (à l'extérieur) pour les restituer sous forme de chaleur à l'intérieur d'un logement. Tout comme un réfrigérateur, une pompe à cha-

leur transfère des calories d'une zone froide en la refroidissant davantage vers une zone chaude... en la chauffant davantage. Le fonctionnement de ces deux machines repose sur les mêmes phénomènes, sur l'évaporation et la condensation d'un fluide frigorigène selon le cycle suivant :
 a) **Un compresseur (4)** comprime un gaz frigorigène, ce qui a pour effet d'en augmenter la température. Le gaz se dirige vers un échangeur de chaleur,
 b) dans ce premier échangeur de chaleur, le **condenseur (1)** figuré en rouge, le gaz cède sa chaleur à la zone à chauffer ce qui a pour effet de le liquéfier dès que sa température devient inférieure à la température à laquelle ce gaz condense compte tenu de la pression imposée par le compresseur. Le condenseur est la partie chaude de la pompe à chaleur
 c) dans le **détendeur (2)**, en se refroidissant le fluide frigorigène liquéfié passe brutalement de l'état liquide à haute pression à celui d'un mélange de liquide et de gaz à basse pression,

d) dans le second échangeur de chaleur, l'**évaporateur (3)** figuré en bleu, en empruntant des calories au milieu extérieur le mélange de gaz et de fluide passe intégralement à l'état de gaz (vapeur sèche). L'évaporateur est la partie froide de la pompe à chaleur.
 e) à la sortie de l'évaporateur, le gaz est repris par le compresseur, comprimé, envoyé chaud vers le condenseur. Un nouveau cycle recommence.



6 Schéma de principe d'une pompe à chaleur

3-2 L'INTÉRÊT ET LES PERFORMANCES DES POMPES À CHALEUR

Globalement une pompe à chaleur transfère des calories depuis l'évaporateur (3) vers le condenseur (1). Mais quel est l'intérêt de transférer des calories depuis un évaporateur vers un condenseur ? L'intérêt est « énorme » et... évident ! Si on « **dépense** » effectivement la quantité d'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du compresseur, cette dépense va permettre de « **pomper** », c'est-à-dire de « **transférer des calories gratuites** » empruntées au milieu extérieur depuis l'évaporateur (3) vers le condenseur (1), c'est-à-dire vers la zone à chauffer. Tout l'intérêt de la pompe à chaleur repose donc sur le fait que l'énergie dépensée dans le compresseur (une énergie qui est d'ailleurs récupérée sous forme de chaleur au bénéfice de la zone à chauffer) est très inférieure à l'énergie gratuite empruntée au milieu extérieur. Si l'on appelle « **Pe** » la puissance électrique du compresseur et « **Pth** » la puissance délivrée à la zone à chauffer, le coefficient de performance de la pompe à chaleur se définit par le rapport $\frac{P_{th}}{P_e}$ ce rapport est le « **coefficient de performance** » de la pompe

Couramment, dans la pratique, ce coefficient atteint une valeur voisine de 4, c'est-à-dire que pour une dépense de 1 kWh (correspondant au travail de compression) on obtient 4 kWh de chauffage dont 3 sont « empruntés gratuitement » à l'extérieur et 1 provient du compresseur. Le coefficient de performance (improprement appelé rendement) d'une pompe à chaleur est évidemment fonction des températures de la source froide (d'où l'on pompe les calories) et de la source chaude (où l'on restitue les calories).

Plus la température à laquelle la pompe à chaleur restitue les calories est basse, meilleur sera le rendement de la pompe. D'où l'intérêt des planchers chauffants basses température (35 °C) par rapport aux radiateurs dont la température de fonctionnement doit être plus élevée (60°C) compte tenu de leur surface d'échange plus petite.

Le coefficient de performance réel d'une pompe à chaleur est fourni par les constructeurs avec des couples de température de sources chaudes et froides différents (par exemple 0-35°C ou 0-60°C ou encore 7-35°C)

La plupart des pompes à chaleur sont réversibles, ce qui signifie que l'été, en fonctionnement inverse, elles peuvent fonctionner en conditionneur, prélever la chaleur dans un logement et restituer cette chaleur à l'extérieur, dans l'environnement.

Une installation de chauffage incluant une pompe à chaleur doit nécessairement disposer d'un chauffage d'appoint de manière à pouvoir faire face à une vague prolongée de très grands froids.

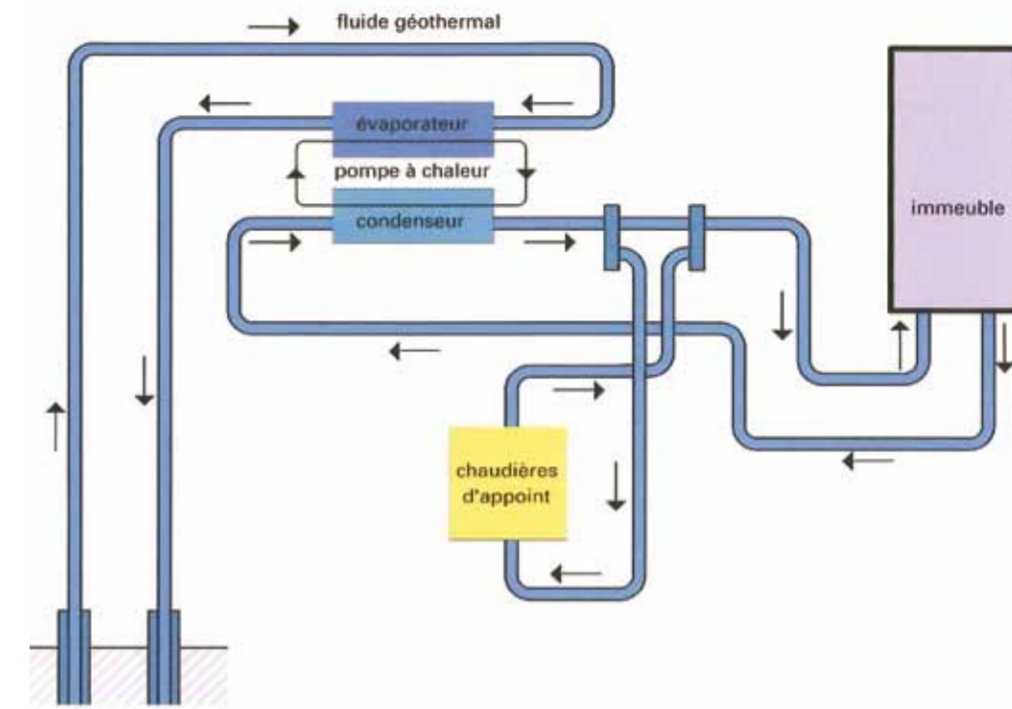
3-3 LES DIFFÉRENTES SOURCES FROIDES POSSIBLES POUR UNE POMPE À CHALEUR

L'eau. L'eau d'un puits, d'une rivière, d'une nappe phréatique, de la mer... constitue une solution idéale à la condition que l'approvisionnement en eau soit garanti même par grands froids. Une autorisation peut s'avérer nécessaire

Le sous-sol.

Deux dispositions sont possibles. Dans la première l'évaporateur est enterré horizontalement à une profondeur d'environ 70 cm. Il faut dans ce cas disposer d'un terrain de surface suffisante (1,5 à 2 fois la surface à chauffer). Dans la seconde, les sondes géothermales de la source froide sont placées dans des puits verticaux. Les températures en profondeur sont plus élevées qu'en surface (dans nos contrées, 13°C à -10 m) et varient peu au cours de l'année. La nécessité de forer des puits entraîne un coût d'installation plus élevé, ce qui contrebalance les avantages de cette disposition.

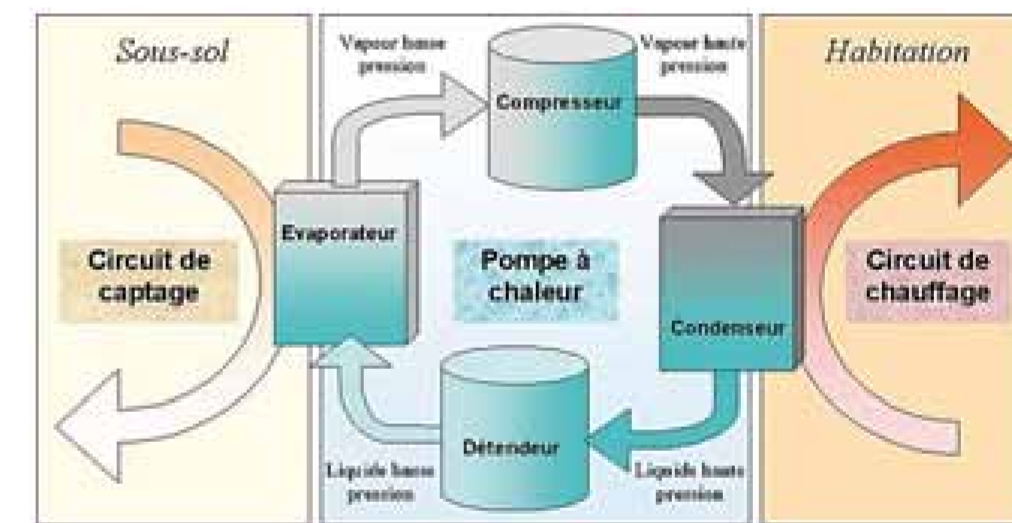
L'atmosphère. C'est la source de calories la plus simple, la moins onéreuse a priori en investissement. Elle présente cependant des inconvénients, les températures de l'air étant très fluctuantes par rapport à celles beaucoup plus stables des sols ou des nappes phréatiques. Les performances d'une pompe dont la source froide est l'atmosphère seront variables et moins bonnes. Les autres inconvénients de cette source froide sont le risque de givrage et le bruit du ventilateur.



7 Chauffage par pompe à chaleur : chaleur extraite du sous-sol

3-4 ASSOCIATION POMPES À CHALEUR-ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

L'association entre une source d'énergie géothermale basse énergie et une pompe à chaleur (figures 7 et 8) est l'exemple même de l'utilisation optimale de la géothermie basse énergie pour assurer le chauffage collectif d'un immeuble, d'une cité ou d'un complexe sportif ou industriel. Cette association entre géothermie et pompe à chaleur nécessite certes un investissement initial élevé mais, en contrepartie, surtout lorsque le coût de l'énergie est élevé (il ne cesse de croître !), le coût de fonctionnement d'une telle installation s'avère être très avantageux.



8 Principe d'un chauffage collectif associant géothermie et pompe à chaleur



L'énergie hydraulique

1) Introduction

1-1 RAPIDE HISTORIQUE

Depuis l'antiquité l'énergie de l'eau en mouvement a été captée en utilisant soit son écoulement (hydraulique au fil de l'eau) soit sa chute (cascade, barrage...). L'eau a, par exemple, été employée pour remonter l'eau dans les jardins ou dans les aqueducs grâce à des systèmes de norias. Plus tard, au Moyen Âge, la roue hydraulique est devenue le moteur activant les moulins et les outils des manufactures, les soufflets des forges et des fourneaux, les marteaux pilons... et ce jusqu'à l'apparition et le développement de la machine à vapeur à la fin du XVIII^{ème} et au début du XIX^{ème} siècle.

A la fin du XIX^{ème} siècle, avec l'arrivée de l'électricité, l'eau retrouve son intérêt. Elle actionne les turbines des usines produisant l'électricité nécessaire à l'éclairage.

Avec quelques dizaines de lampes pour l'éclairage public, Bellegarde, sur le Rhône, est la première ville de France à être électrifiée en 1884. Début certes modeste mais qui marque celui de la révolution de la vie dans les cités.

Au XX^{ème} siècle l'hydroélectricité, surnommée « **Houille Blanche** », connaît un essor considérable.

En France, après la seconde guerre mondiale, l'hydraulique a représenté jusqu'à 50 % de la production électrique nationale. Bien que depuis lors la production hydraulique ait été multipliée par plus de 4, aujourd'hui elle ne représente plus que 13 % de la production totale. En 2008, pour une production électrique nationale de 549 milliards de kilowattheures (549 TWh), la production hydraulique nette était de 68 TWh soit 12,4 % de la production nationale.

1-2 QUELQUES NOTIONS GÉNÉRALES

- La production hydraulique varie d'une année à l'autre en fonction des quantités d'eau disponibles, des quantités apportées par la fonte des neiges et par les précipitations. Ces dernières années elle a oscillé entre un minimum de 58 TWh et un maximum de 72 TWh.

Il existe une grande disparité entre les différentes régions du monde. Certaines bénéficient d'un potentiel hydraulique considérable, le continent Sud-américain produit 72 % de son électricité grâce à l'hydraulique (et le Brésil... 83 % !) tandis que d'autres régions en sont plus ou moins dépourvues. D'une manière générale, les zones équatoriales et les zones septentrionales (Canada, Islande, Norvège...) bénéficient d'un énorme potentiel hydraulique.

En 2008, et en moyenne, l'hydraulique a participé à hauteur de 14 % (2 800 TWh) à la production totale mondiale d'électricité (20 000 TWh).

- Chaque installation de production d'énergie est caractérisée par sa « **puissance installée** » (s'exprimant en kW ou MW) et sa « **production annuelle d'énergie** » (s'exprimant en MWh ou en gigawattheure GWh (1 GWh = 1 000 MWh ou 1 000 000 kWh)).

La **puissance installée** est la puissance maximale que l'installation peut fournir.

La **production annuelle** dépend de la puissance installée mais aussi, et tout autant, de la quantité d'eau dont la centrale a pu disposer pour son fonctionnement au cours de l'année.

On calcule le « **facteur de charge** » d'une centrale en divisant la production annuelle d'énergie par la puissance installée. Par ce (petit !) calcul on obtient le « **nombre d'heures équivalent pleine puissance** » de fonctionnement c'est-à-dire le nombre d'heures pendant lesquelles la centrale aurait dû fonctionner en continu à sa puissance maximale pour produire cette énergie.

En divisant ce nombre d'heures équivalent pleine puissance par le nombre d'heures dans l'année (8 760) on obtient le taux de charge qui s'exprime en pourcentage.

Ce taux de charge prend en compte le fonctionnement réel de l'installation, il inclut les fonctionnements à charge partielle (parfois causés par un manque d'eau) et les arrêts de production pour effectuer des opérations de maintenance ou les arrêts suite à des avaries. Un taux de charge est donc toujours inférieur à 100 %.

Au niveau mondial la puissance hydraulique installée est de 715 000 MW, la production totale étant de 2 800 milliards de kWh (2 800 TWh), on en déduit que le taux de charge moyen mondial de l'hydraulique est de 44 %. Sur les 8 760 heures que comporte une année, au niveau mondial, les centrales hydrauliques ont fonctionné l'équivalent de 3 850 heures à leur pleine puissance.

2) L'hydraulique terrestre : les centrales hydro-électriques

2-1 RELATION ENTRE LA PUISSANCE, LE DÉBIT D'EAU ET LA HAUTEUR DE CHUTE

La puissance instantanée (**P**) d'une centrale hydraulique est proportionnelle au débit instantané (**Q**) de l'eau passant dans les turbines et à la hauteur (**H**) de la chute.

Pour un rendement (**p**), toujours inférieur à 1, la puissance s'exprime par la relation :

$$P = Q \times H \times p$$

La production d'une centrale, outre sa puissance, est fonction de l'apport variable des cours d'eau alimentant le site de la centrale.

Les quantités d'eau disponibles pour la production varient dans le temps en fonction de la régularité des apports en eau. Selon l'amplitude et la durée des variations de débit au cours d'une l'année, et selon le mode de fonctionnement de la centrale (intermittent ou continu), il est, ou non, nécessaire de disposer d'une retenue d'eau à l'amont de la centrale.

La **production annuelle (W_a)** d'une centrale est proportionnelle à la quantité d'eau que la centrale aura turbinée pendant toute l'année (**Q_a**) et à la hauteur moyenne annuelle de la chute (**H_{moy}**), cette hauteur variant en fonction du niveau de remplissage de la retenue :

$$W_a = Q_a \times H_{moy} \times p$$

2-2 LES CENTRALES « AU FIL DE L'EAU »

2-2-1 Leur implantation

Ce type de centrales hydrauliques est généralement installées en plaine ou au pied des massifs montagneux sur des fleuves ou des rivières dont la pente est faible, mais dont le débit est important et relativement peu variable au cours de l'année.

En plaine, la pente des fleuves et des rivières est faible, aussi, pour disposer d'une hauteur de chute suffisante, il est nécessaire d'ériger un barrage à l'amont de la centrale. Ce barrage n'a pas pour but de créer une retenue en amont, une réserve d'eau, il a pour unique fonction de dévier l'eau vers l'entrée d'un canal, le « **canal d'amenée** », qui amène l'eau jusqu'à la centrale où elle est turbinée. A la sortie des turbines l'eau est (en principe...) restituée au lit naturel du fleuve. Plus généralement elle est dirigée de nouveau vers un autre canal d'amenée dans le but d'alimenter une centrale au fil de l'eau située à l'aval de la précédente.

C'est ainsi que les grands fleuves, le Rhône, le Rhin, la Durance... sont équipées d'une succession ininterrompue de centrales au fil de l'eau reliées les unes aux autres par des canaux d'amenée.

1 Le canal d'amenée (longueur totale, 24 km) entre Donzère et Mondragon sur le Rhône alimentant l'usine Hydroélectrique André Blondel de Bollène. Sur la gauche le canal navigable au passage de l'écluse de Bollène.

En plaine la longueur d'un canal d'amenée d'eau à une centrale peut atteindre plusieurs kilomètres soit la longueur nécessaire à l'obtention d'une dénivellation suffisante (10 mètres minimum) entre l'entrée du canal d'amenée et le niveau de l'eau restituée à la sortie de la centrale.

2-2-2 fonctionnement des centrales au fil de l'eau

- Le débit prélevé par un canal d'amenée varie peu au cours de l'année. Les centrales au fil de l'eau fonctionnent de manière assez régulière, fournissant en continu une électricité dite de base. On qualifie le mode de production des centrales au fil de l'eau du doux nom de « **fatale** ».

- La puissance installée de ces centrales est déterminée par la valeur du débit moyen observé durant le mois où le fleuve a le débit le plus élevé. - Lorsque le débit du fleuve est supérieur au débit pouvant être turbiné par la centrale (ou suite à un arrêt de la centrale pour maintenance, en cas de crues...) le surplus de l'eau est déversé par le barrage amont dans le lit naturel du fleuve.

- Les exploitants des centrales hydrauliques ont l'obligation de laisser passer un débit minimum d'eau dans le lit naturel des cours d'eau sur lesquels elles sont installées. La valeur de ce débit minimum, dit « **débit réservé** », est fixée par décret. Elle est déterminée en fonction des besoins nécessaires à la préservation de la vie aquatique, à l'alimentation des nappes phréatiques situées à l'aval des centrales et aux besoins de l'irrigation.

Le taux moyen d'utilisation des centrales au fil de l'eau est de 57%, correspondant à un fonctionnement à pleine puissance de 5 000 heures sur les

8 760 heures que comporte une année.

En France la puissance installée totale de ce type de centrale est important, 7 500 MW. Elles fournissent en moyenne 55% de l'électricité d'origine hydraulique.

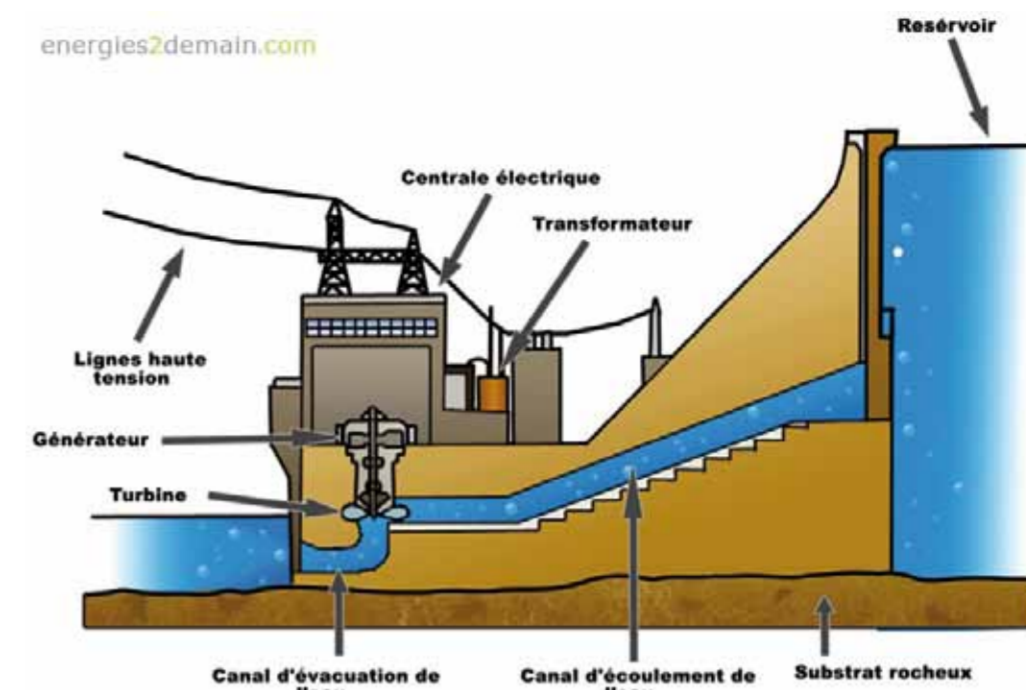
2-3 LES CENTRALES AVEC RETENUE

Lorsque le débit d'un cours d'eau varie de manière importante pendant l'année, on est amené à constituer une réserve d'eau plus ou moins importante à l'amont des centrales. L'eau y est stockée lorsqu'elle arrive en abondance pour être ultérieurement turbinée en fonction des besoins du réseau électrique.

Généralement pour constituer une réserve il est nécessaire de construire un barrage de retenue. La centrale par elle-même (les turbines et les alternateurs) est située soit au pied du barrage soit, au contraire, pour les centrales de haute chute, à plusieurs kilomètres du barrage de retenue. Pour ces dernières, l'eau est amenée depuis la retenue par des galeries creusées dans la montagne ou par des conduites forcées.

2 Schéma d'une centrale d'éclusee située au pied du barrage de retenue

energies2demain.com



2 Schéma d'une centrale d'éclusee située au pied du barrage de retenue

b) les centrales de lac de haute chute.

Elles sont situées en montagne (Alpes, Pyrénées...) sur des cours au débit relativement faible, mais surtout irrégulier, principalement alimentés par la fonte des neiges et les pluies d'orage. Ces centrales bénéficient en contrepartie de dénivellations importantes, de plusieurs centaines de mètres à plus de 1000 mètres entre la retenue et la centrale elle-même.

Relativement aux apports du cours d'eau sur lequel elles sont installées, ces centrales disposent de retenues importantes qui se remplissent lentement et de manière saisonnière (fonte des neiges, orages...).

Ces centrales sont situées très bas par rapport à la retenue d'eau associée. L'eau y est amenée depuis la retenue soit par des galeries creusées à même la montagne, soit par des conduites forcées qui courent le long du flanc des montagnes. Le démarrage rapide et le fonctionnement très souple de ces centrales les rendent rapidement disponibles et adaptées au suivi des demandes du réseau lors des périodes de forte demande ou en cas d'aléas sur le réseau.

En contrepartie, leur temps de fonctionnement est limité par le caractère saisonnier des apports et par le volume d'eau arrivant annuellement dans la retenue. Le taux d'utilisation moyen de ces centrales est de 20 % (1 800 heures équivalent pleine puissance par an).

La puissance installée totale des centrales de haute chute est importante : 9 300 MW. Elles participent à hauteur de 25% à la production hydraulique nationale.

2-4 LES STATIONS DE TRANSFERT D'ÉNERGIE PAR POMPAGE (LES STEP)

Un nom et un sigle compliqués pour désigner une centrale hydraulique de type éclusee ou de haute chute capable de fonctionner « dans les deux sens », soit en turbinant de l'eau, soit en pompant de l'eau.

Le principe des STEP : a) Ces centrales disposent de deux réservoirs, un **réservoir amont** de grande capacité situé à un niveau supérieur à celui de la centrale et un **réservoir aval**, généralement plus petit, situé à la sortie de la centrale sensiblement au même ni

veau que celle-ci.

b) Pendant les heures de forte consommation, comme toute centrale, une STEP produit de l'électricité en turbinant l'eau provenant de son réservoir supérieur situé à l'amont. La première particularité des STEP est que l'eau turbinée sortant de la centrale est stockée dans le réservoir inférieur situé à l'aval et non pas restituée au lit naturel du torrent ou de la rivière.

c) Pendant les heures creuses, lorsque la consommation d'électricité est faible et que le prix de l'électricité fournie par les centrales fonctionnant en base (nucléaire ou « au fil de l'eau ») est au plus bas, on utilise cette électricité « bon marché » pour pomper l'eau précédemment stockée dans le réservoir aval et la remonter dans le réservoir amont. Ici réside la seconde particularité des STEP : les machines sont réversibles, la même machine étant capable de fonctionner tantôt en pompe tantôt en turbine.

3 Les STEP, une histoire de Shadocks ? Pas vraiment !

Quel est l'intérêt des STEP ?

Physiquement, pomper l'eau du réservoir aval pour la remonter dans le réservoir amont, revient en fait à stocker dans le réservoir amont une énergie (sous forme potentielle) égale au produit de la masse d'eau remontée par la dénivellation existant entre les deux réservoirs, aval et amont.

Sur le plan économique et vis-à-vis des besoins du réseau électrique, les STEP ont pour finalité de **stocker de l'énergie sous forme potentielle** par pompage au moment où le prix de l'électricité actionnant les pompes est au plus bas, puis de restituer cette énergie sous forme d'électricité lorsque la demande est la plus forte et le prix de l'électricité au plus haut.

Le rendement des STEP, du cycle de pompage et de restitution par turbinage est inférieur à 1. Ce mode de stockage puis de restitution de l'énergie est néanmoins économiquement rentable tant qu'il est possible de se procurer de l'énergie à bas coût pendant les heures creuses pour la restituer lorsque la demande et les coûts de production sont élevés.

En 2008 les STEP ont consommé 6 TWh en heures creuses et ont restitué 5 TWh pendant les heures de pointe, on en déduit que le rendement moyen global du stockage d'énergie par les STEP est voisin de 83 %. Les STEP fonctionnent en fourniture d'électricité environ 2 000 heures par an.

L'idée des STEP n'est pas nouvelle : la première installation de ce type, d'une puissance de 80 MW, a été mise en service en 1933 dans les Vosges. Elle fonctionne en utilisant la dénivellation de 120 m existant entre deux lacs naturels, le Lac Blanc et le Lac Noir.

En France il existe une dizaine de STEP capables de démarrer en quelques minutes et de fournir une puissance totale de 5 000 MW.

Parmi ces STEP, Super Bissorte, Le Cheylas et la Coche, Montézic (Massif central), Revin (Ardennes...) etc. La plus importante, d'une puissance installée de 1 800 MW, est installée dans la vallée de l'Eau d'Olle entre la retenue du barrage de Grand Maison (altitude 1695 m, capacité de 132 millions de m³) et le lac artificiel du Verney (altitude 768 m capacité de 14 millions de m³).

Aujourd'hui, avec un rendement supérieur à 80 %, les STEP sont le seul véritable **moyen économique de stockage d'énergie de grande capacité**. De ce fait, dans le futur, les STEP auront très certainement un rôle important, celui de pallier l'intermittence des productions éoliennes et photovoltaïques en stockant l'énergie excédentaire qu'elles produisent à certains moments pour la restituer en période de vent faible ou nul (pour l'éolien) ou la nuit (pour le photovoltaïque). Il existe actuellement plusieurs projets associant les champs éoliens off-shore à des STEP, terrestres ou maritimes, utilisant généralement des installations à faible hauteur de chute.

2-5 LA « PETITE HYDRAULIQUE »

On désigne par « **petite hydraulique** » les installations, mini ou micro centrales, d'une puissance inférieure à 12 MW. En France il en existe environ 1 700, représentant 2 % de la production nationale soit 7,5 TWh/an.

La petite hydraulique permet une production décentralisée et l'auto-alimentation d'exploitations agricoles, d'usines ou de particuliers. En application des directives européennes, la petite hydraulique peut bénéficier de l'obligation d'achat par EDF de l'électricité qu'elles produisent. Le tarif d'achat varie selon la puissance de l'installation, de la régularité de la production et du moment où l'électricité est produite.

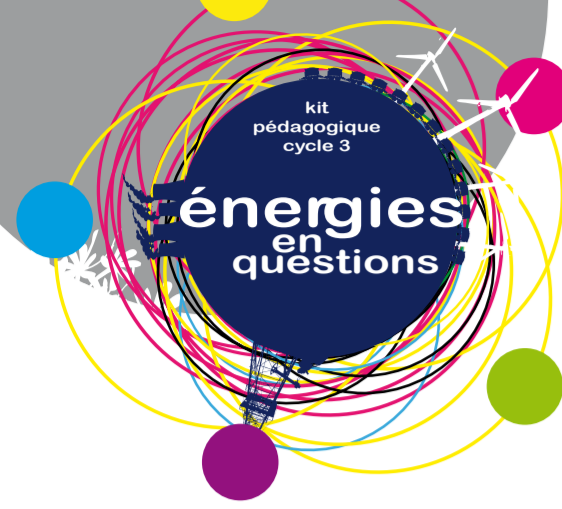
La plupart de ces centrales sont subventionnées au titre des aides aux énergies renouvelables. Le développement de la petite hydraulique est cependant limité par les contraintes administratives et environnementales résultant du classement des cours d'eau. Sur certains cours d'eau, le Conseil supérieur de la pêche n'autorise aucune installation.

1 Le canal d'amenée entre Donzère et Mondragon sur le Rhône



3 Les STEP, une histoire de Shadocks ? Pas vraiment !





3) L'hydraulique marine

L'idée d'utiliser les mouvements des masses d'eau générés par les marées ou les courants n'est pas récente. Les « moulins à marée » existaient déjà au Moyen Age. La nouveauté dans la manière d'utiliser l'énergie des marées, des courants et des vagues réside dans les innovations techniques actuellement en cours d'expérimentation dans le but d'exploiter ce potentiel énergétique.

3-1 LES USINES MARÉMOTRICES

Pour être économiquement intéressantes, ces usines doivent être implantées sur des sites favorables où la différence des niveaux (le marée) entre la haute et la basse mer est très importante. Malheureusement les sites intéressants et économiquement viables sont peu nombreux, ce sont essentiellement des estuaires où le marée est voisin d'une dizaine de mètres et plus.

En France ce sont : l'estuaire de la Rance, sur lequel une centrale de 240 MW a été réalisée dans les années 60, et la baie du Mont Saint Michel avec l'ancien projet (abandonné) de fermeture des Iles Chauzey. En Grande Bretagne il existe un projet, celui de l'estuaire de la Severn. Le coût d'investissement de ces centrales marémotrices, est estimé à plus de 4 000 € / kW installé pour la Severn. Ce coût est très élevé surtout si on le ramène à un taux d'utilisation de 30 %, soit l'équivalent de 2 500 heures de fonctionnement annuel à pleine puissance (taux d'utilisation de l'usine marémotrice de la Rance).

L'expérience acquise à l'usine marémotrice de la Rance montre par ailleurs que le coût de l'exploitation de ce type de centrale, en particulier le coût de la maintenance, est assez élevé. Les principales difficultés rencontrées viennent du caractère agressif (corrosif et abrasif) du milieu marin. Elles concernent la tenue des ouvrages de génie civil (tenue des bétons et corrosion du ferrailage), l'envasement du bassin intérieur par d'importants transferts de sédiments, l'érosion des organes mobiles des turbines par les sables abrasifs et les galets...

A travers le monde, peu de projets sont actuellement à l'étude bien qu'au plan mondial on estime à 22 000 TWh (soit l'équivalent actuel de la production mondiale d'électricité !) le potentiel énergétique offert par les mouvements d'eau générés par les marées.

Compte tenu des difficultés évoquées ci-dessus, on estime que seul un dixième de ce potentiel énergétique pourrait être exploité dans le futur.

3-2 LES NOUVEAUX PROJETS

Parmi les multiples innovations en cours d'expérimentation, l'exploitation de l'énergie des vagues et l'exploitation des courants marins semblent les voies les plus prometteuses, au moins à moyen terme.

- **L'énergie houlomotrice.** Elle utilise les oscillations de la surface de l'eau (les vagues) générées par le vent.

L'idée est d'utiliser le mouvement alternatif de montée et de descente de corps flottants et de récupérer l'énergie mécanique générée par ce mouvement afin d'entraîner un générateur d'électricité.

Un premier projet de taille industrielle (2,25 MW) a été testé en Grande Bretagne puis transféré au Portugal en 2009. Après de nombreux déboires et retours à terre, le projet semblait provisoirement abandonné.

D'autres mécanismes reposant toujours sur le principe de masses flottantes oscillant lentement au rythme des vagues sont en cours de réalisation ou d'expérimentation dans le cadre de programmes financés par les Etats et l'Union européenne.

En théorie le potentiel énergétique des vagues est équivalent à celui des marées, soit à l'échelle mondiale, plus de 20 000 MW. L'exploitation de l'énergie de la houle se heurte à des difficultés technologiques qui ne sont pas encore surmontées, en particulier la tenue mécanique des matériels et des liaisons lors des tempêtes.

- **L'énergie hydrolienne.** Le principe de l'hydrolienne (figures 4, 5 et 6) est identique à celui des éoliennes (qu'il est inutile de rappeler !) sauf que l'hydrolienne est une machine immergée, soit en mer soit en rivière, et quelle est actionnée, non par le vent, mais par les courants marins.

4 Principe de l'hydrolienne (en réalité une vue d'artiste irréalisable telle quelle !)

Le principe est a priori séduisant car l'eau étant 800 fois plus dense que l'air, et la puissance d'une éolienne ou d'une hydrolienne étant proportionnelle à la masse spécifique du fluide qui les entraîne, on pourrait en déduire, qu'à taille de machines égale, la puissance d'une hydrolienne est 800 fois supérieure à celle d'une éolienne ! Le miracle ?

Il n'en est rien ! En réalité la vitesse des courants marins n'est, au mieux, que de quelques mètres par seconde tandis que la vitesse du vent varie entre 10 et 25 m/s soit un rapport de 1 à 10 entre les vitesses des courants et celles des vents. Sachant (voir le chapitre consacré aux éoliennes) que la puissance des hydroliennes, tout comme celle des éoliennes, est proportionnelle au cube de la vitesse du fluide qui les traverse... et que 10 au cube égal 1 000... on trouve, d'un côté, un facteur 800 favorable à la puissance des hydroliennes et, de l'autre, un facteur 1 000 favorable à celle des éoliennes !

En France, on envisage d'implanter les hydroliennes prototypes au large de la Bretagne et du Cotentin où les courants sont les plus forts. Pour donner un ordre d'idée de la participation possible des hydroliennes à la production électrique, 3 000 MW installées auraient une production annuelle d'environ 10 TWh.

5 Hydrolienne d'une puissance de 1MW, diamètre 15 m, longueur 19m (Rotech, Corée)

Des premiers essais ont été réalisés en 2010 sur un site au large de Paimpol-Bréhat où quatre turbines prototypes de 16 m de diamètre, d'une puissance unitaire de 500 kW, ont été immergées par 35 m de fond. Outre une abrasion importante des pales par le sable en suspension, ces essais ont montré que la tenue mécanique des pales était insuffisante (les hydroliennes se sont par-

tiellement « déplumées ») et qu'en conséquence leur conception devait être notablement revue et modifiée. Ces premiers déboires ne pénalisent en rien la validité du concept ni le déroulement ultérieur du programme d'essais.

6 Mise à l'eau d'une hydrolienne (France)

3-3 LES PROJETS PLUS FUTURISTES

Ils concernent :

a) L'utilisation de **l'énergie thermique des mers** (l'ETM) qui consiste à récupérer de l'énergie sous forme thermique en jouant sur l'écart de température existant entre les eaux de surface (24°C aux tropiques) et les eaux profondes des océans (4°C aux grandes profondeurs) en utilisant, tout comme dans un réfrigérateur ou une pompe à chaleur, l'ébullition et la condensation d'un fluide volatil à basse température.

b) **L'énergie osmotique.** Le principe est d'utiliser, à partir d'un réservoir d'eau douce, le passage de l'eau douce au travers d'une membrane semi-perméable vers un autre réservoir contenant de l'eau salée. La surpression créée par l'arrivée de l'eau douce dans le réservoir d'eau salée est utilisée pour actionner un mécanisme.

Il ne s'agit encore que d'un principe développé en laboratoire. Le groupe public norvégien de production d'électricité Statkraft expérimente actuellement un prototype d'une puissance de 10 kW fonctionnant sur ce principe de l'osmose.

4 Le coût de la production hydraulique terrestre

a) La réalisation des installations hydrauliques, qu'elles soient terrestres ou marines, nécessite des investissements très importants. A titre indicatif, pour ces grandes centrales, l'investissement varie de 1 000 € par kW installé pour les sites les plus favorables à plus de 2 000 € / kW pour les sites plus difficiles. Pour la célèbre centrale des Trois Gorges en Chine, d'une puissance de 18 200 MW, l'investissement est estimé entre 35 et 40 milliards d'euros.

Pour les grandes centrales hydrauliques l'investissement peut peser pour plus de 85 % dans le coût du kWh durant la période d'amortissement.

b) Contrebalançant l'importance des investissements à consentir, une fois l'amortissement réalisé, les charges d'exploitations sont peu élevées pour la simple raison qu'il n'y a pas de combustible à acheter... ce qui ne veut pas dire que l'eau soit « gratuite ». L'eau étant considérée comme un bien public, aux dépenses courantes d'exploitation et de maintenance l'exploitant doit s'acquitter des taxes et des redevances pour l'usage de l'eau qu'il utilise... bien qu'il la restitue intégralement. Selon le type de centrale, l'ensemble des charges d'exploitation varie entre 1 et 3 centimes d'euro par kWh.

c) Les centrales au fil de l'eau dont le fonctionnement en base est continu (taux d'utilisation 55 %) fournissent l'électricité au meilleur coût. Cependant, fonctionnant par principe toujours à la puissance la plus élevée possible compte tenu du débit du fleuve, elles ne participent pas au suivi de la demande, au maintien de l'équilibre

instantané entre l'offre et les besoins du réseau général.

Au contraire, par leur souplesse d'utilisation, les centrales d'écluse et les STEP sont indispensables à l'ajustement instantané de la production à la demande. Leur participation à l'équilibre production-consommation, c'est-à-dire leur participation à la stabilité et à la sécurité du réseau électrique national (et maintenant à celles du réseau européen), constitue une plus-value très importante qui compense et justifie leur coût d'exploitation plus élevé que celui des centrales au fil de l'eau produisant (fatalement !) l'électricité de base.

5) Avantages et inconvénients de l'hydraulique

Comme toute activité humaine et industrielle l'exploitation du potentiel hydraulique des cours d'eau présente des avantages et des inconvénients. Ces avantages et ces inconvénients concernent l'environnement, la santé et l'économie.

Dans le monde, l'importance de la production hydraulique n'est plus à établir, en particulier dans les pays émergents.

En 2000 elle a représenté 100% de la production électricité dans 13 pays, plus de 80% de la production dans 31 pays et plus de 50% dans 61 pays. En Europe l'hydraulique ne produit que 13% de l'électricité (15% en France).

En Europe occidentale les sites les plus intéressants d'un point de vue économique ont, pour la plupart, déjà été équipés, l'hydraulique connaît surtout son essor dans les régions non encore pourvues, Asie, Amérique du Sud, Afrique équatoriale...

5-1 LES AVANTAGES

- L'hydraulique est une **énergie renouvelable** fournissant l'électricité pratiquement **sans aucune émission de gaz à effet de serre.**

En comptabilisant les émissions incluant la construction des ouvrages et leur exploitation, la production d'un « **kilowattheure hydraulique** » n'entraîne l'émission que de 5 grammes de CO2 par kWh.

Cette émission est à comparer aux 1 000 grammes, ou plus, émis en moyenne par kWh par une centrale brûlant du charbon, aux 650 grammes/kWh si le gaz naturel est substitué au charbon, aux 60 à 150 grammes/kWh pour le photovoltaïque, aux 3 à 22 grammes kWh pour l'éolien selon qu'il est terrestre ou off-shore et aux 6 grammes/kWh pour le nucléaire. Avec une production mondiale annuelle de 2 800 TWh (dont 90% sont produits par la grande hydraulique), l'hydraulique, énergie renouvelable par excellence, permet d'éviter la production et le rejet dans l'atmosphère d'un demi-milliard de tonnes de gaz à effet de serre.

Nota. Il est étonnant que la contribution de la « grande » hydraulique à la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre ne soit reconnue ni par les grandes institutions internationales ni par les protocoles découlant de celui de Kyoto. En effet, selon leurs critères, la grande hydraulique n'est pas comptabilisée en tant qu'énergie renouvelable. Seul « small » serait-il « beautiful » ?

- Ne nécessitant pas l'achat de combustible, le coût moyen de production de l'électricité des centrales hydrauliques est plus bas que les coûts des autres moyens de production d'électricité. Ce coût est totalement indépendant du cours des combustibles et de ses fluctuations qui interviennent de façon prépondérante dans le coût de production de l'électricité d'origine thermique non nucléaire (75% du coût du kWh pour les centrales brûlant du gaz et 40 % pour celle brûlant du charbon).

Le coût de la production hydraulique est peu sensible aux tensions internationales, hormis le cas des grands fleuves traversant le territoire de plusieurs Etats pour lesquels un éventuel problème de partage des eaux peut se poser... se posant même parfois de manière conflictuelle.

- Les aménagements hydrauliques sont souvent l'occasion de créer ou de moderniser les **systèmes d'irrigation** préexistants, de développer l'irrigation et l'agriculture, d'aménager le cours des fleuves afin de les rendre navigables.

- Les aménagements les plus importants ont un rôle de **régulation et de lissage du débit**, voire d'absorption des crues.

- L'hydroélectricité est souvent le premier stade de l'électrification d'un pays. A ce titre, son développement a toujours été un **facteur de progrès important**, non seulement sur le plan industriel, agricole et économique, mais aussi sur celui de la santé générale.

Ce qui fut vrai en France dans les années qui ont suivi la seconde guerre mondiale, l'est actuellement pour nombre de pays émergents s'engageant dans leur électrification. Comme il a été montré dans le chapitre d'introduction de ce livre sur l'énergie, il est en effet démontré que l'électrification dans les pays émergents est fortement corrélée à l'allongement de la durée de la vie et à sa qualité. L'électrification entraîne une diminution de la pénibilité et de la dangerosité des tâches, le développement des industries et des moyens de communication, la production et la distribution d'eau potable entraînant une amélioration considérable de l'hygiène et de la santé en général.

Ce n'est pas un hasard si actuellement le développement le plus important de l'hydraulique s'observe en Chine, en Inde, au Brésil, en Iran, en Turquie... pour ne citer que les pays les plus dynamiques.

5-2 LES INCONVÉNIENTS

- Les grands aménagements, la construction des barrages, des digues et des ouvrages destinés à la navigation fluviale **perturbent et modifient les écosystèmes.** L'impact écologique de ces grands ouvrages reste important malgré les précautions prises et les dispositifs spéciaux mis en œuvre (préservation des frayères à l'aide d'« ascenseurs » permettant aux poissons de remonter le cours naturel des rivières, alimentation des nappes phréatiques et de l'agriculture par un débit « réservé » minimum garanti...etc.).

Les dispositions nécessaires pour réduire au maximum les nuisances de ces ouvrages ne sont pas toujours prises, soit par ignorance soit de manière délibérée.

- Par manque de vigilance ou par insuffisance des études d'impact préalables, ces ouvrages peuvent parfois conduire à des **catastrophes écologiques** de grande ampleur, glissements de terrain, modifications des estuaires et des

deltas... En favorisant une irrigation irraisonnée, indirectement, l'hydroélectricité peut entraîner la remontée des sels du sous-sol rendant incultes des terres initialement cultivables et conduisant à terme à leur abandon.

- Sur le **plan social**, le principal grief fait à l'énergie hydraulique est l'importance de l'emprise au sol des retenues et la submersion de très grandes superficies. L'ampleur des déplacements de population est d'autant plus importante que, avant d'être submergés, les abords des rivières et des fleuves étaient généralement des zones à forte densité de population et à activité agricole intensive.

A titre d'exemple, l'aménagement de la centrale des Trois Gorges en Chine a nécessité l'inondation de plus de 1 084 km2 de terres, pour la plupart cultivées, et le déplacement de 1,8 million de personnes.

7 Barrage des trois gorges sur le Yangtsé. Longueur 2300 m, puissance installée 18 300 MW

Ces déplacements posent d'énormes problèmes de logement, de reconversion, de reclassement, de création de nouvelles activités créatrices d'emplois... sans compter les multiples troubles infligés aux populations en raison des traumatismes provoqués par la perte de leur emploi et la destruction de leur cadre de vie ancestral.

- Le risque majeur de l'hydroélectricité réside dans la colossale énergie potentielle contenue dans les masses d'eau accumulées derrière la voûte des barrages et du déversement de celles-ci en cas de rupture ou de débordement.

Potentiellement, les causes de défaillance sont multiples : les infiltrations qui minent les fondations, un ancrage défaillant dans le rocher, un séisme de grande magnitude, une surveillance défaillante, un manque d'entretien... Toute cause pouvant conduire à la ruine partielle ou totale d'un ouvrage.

8 Barrage de Malpasset, France, avant et après sa rupture le 2 décembre 1959

Afin d'éviter une catastrophe majeure, une surveillance stricte des points sensibles des ouvrages doit être assurée : surveillance géologique des terrains, surveillance en continu des infiltrations ainsi que des déformations et des mouvements des ouvrages, visites périodiques et contrôle décennal des ouvrages après vidange complète de la retenue...

Bien que les accidents soient relativement rares, on en déplore cependant un certain nombre. Le plus souvent les catastrophes sont imputables à des pluies diluviennes ou à des crues exceptionnelles qui, dans la majorité des cas, ont abouti à la dégradation puis à la rupture de barrages en terre destinés à l'irrigation ou à la régulation des crues.

6) En guise de conclusion, quelques commentaires

A l'échelle mondiale, la consommation d'électricité ira inéluctablement en augmentant compte tenu de l'accroissement de la population et de la volonté légitime des plus démunis d'accéder aux usages de l'électricité. Soulignons de nouveau qu'un tiers de la population mondiale est encore actuellement privée d'électricité...

Afin de répondre aux nouveaux besoins, il est souhaitable que, dans le futur, l'énergie hydraulique, énergie renouvelable à coût peu élevé et non émettrice de gaz à effet de serre, puisse se développer prioritairement où cela est possible.

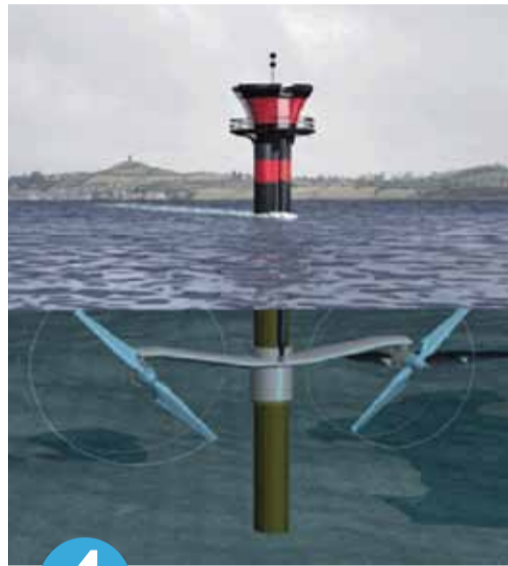
A l'échelle de la planète on estime à 7 200 TWh par an la production hydraulique potentielle économiquement viable. Cette estimation correspond au triple de la production hydraulique mondiale actuelle. Cet énorme potentiel restant à valoriser se trouve principalement dans les pays les plus démunis ou émergents. Ce potentiel ne pourra cependant être valorisé et exploité que moyennant une aide financière importante de la part des grandes institutions internationales, or à ce jour ces grandes institutions s'interrogent.

Elles s'interrogent, sans doute à juste titre, sur les effets indésirables de certains grands projets, sur leur impact environnemental, sur l'importance du nombre de personnes à déplacer et sur la compatibilité de ces projets avec ce que ces institutions définissent, selon leurs propres critères, comme étant un « développement durable ».

En clair, ces institutions sont réticentes face à certains grands projets. Essentiellement dirigées par les « pays développés » qui en assurent le financement, ces institutions devraient cependant se remémorer la manière dont les pays auxquels elles appartiennent, et qui les mandatent, se sont comportés par le passé, la manière dont ils sont parvenus jusqu'au stade avancé de leur développement actuel.

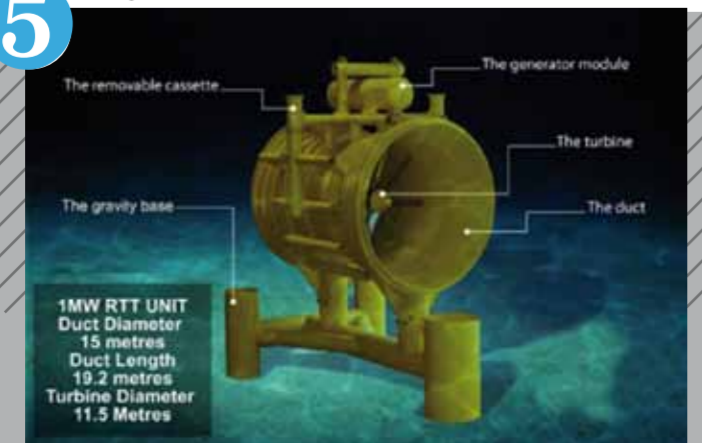
Cette manière n'a pas toujours été très précautionneuse, tant sur le plan environnemental que sur le plan social.

Elles devraient également s'interroger au sujet des critères qu'elles fixent et imposent, sur la manière dont elles projettent - de manière souvent assez sélective et partielle - leurs récentes et vertueuses préoccupations environnementales sur les projets destinés aux pays plus démunis dont les préoccupations premières et vitales sont notamment différentes de celles des pays développés de l'OCDE.



4 Principe de l'hydrolienne en réalité une vue d'artiste irréalisable telle quelle !

5 Hydrolienne d'une puissance de 1MW, diamètre 15 m, longueur 19m (Rotech, Corée)



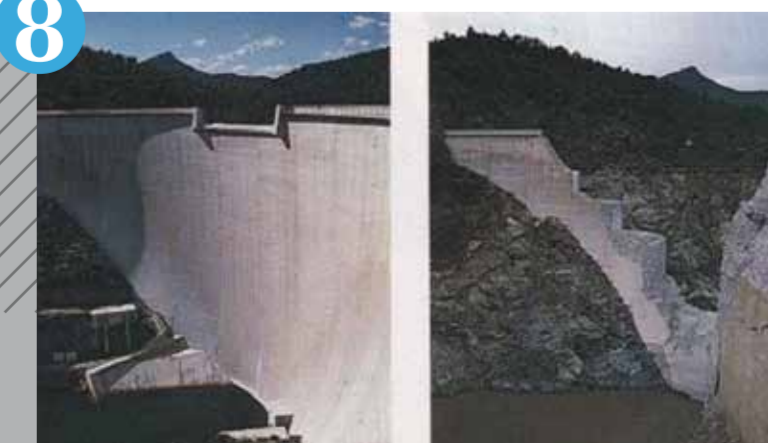
6 Mise à l'eau d'une hydrolienne (France)

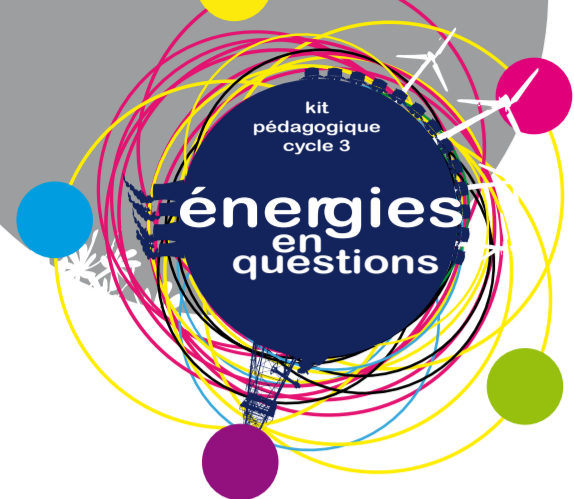


7 Barrage des trois gorges sur le Yangtsé. Longueur 2300 m, puissance installée 18 300 MW



8 Barrage de Malpasset, France, avant et après sa rupture le 2 décembre 1959





Définitions, formation

1) Définitions et généralités

On regroupe sous l'appellation « **d'énergies fossiles** » les sources d'énergie primaire carbonée que sont :

- les hydrocarbures liquides, pétroles et gaz de pétrole (butane et propane) et les hydrocarbures gazeux dont le gaz naturel essentiellement composé de méthane,
- les combustibles solides, charbons, lignite et tourbe.

Ces sources d'énergies sont dites fossiles car toutes ont été formées au cours des ères géologiques à partir de la biomasse.

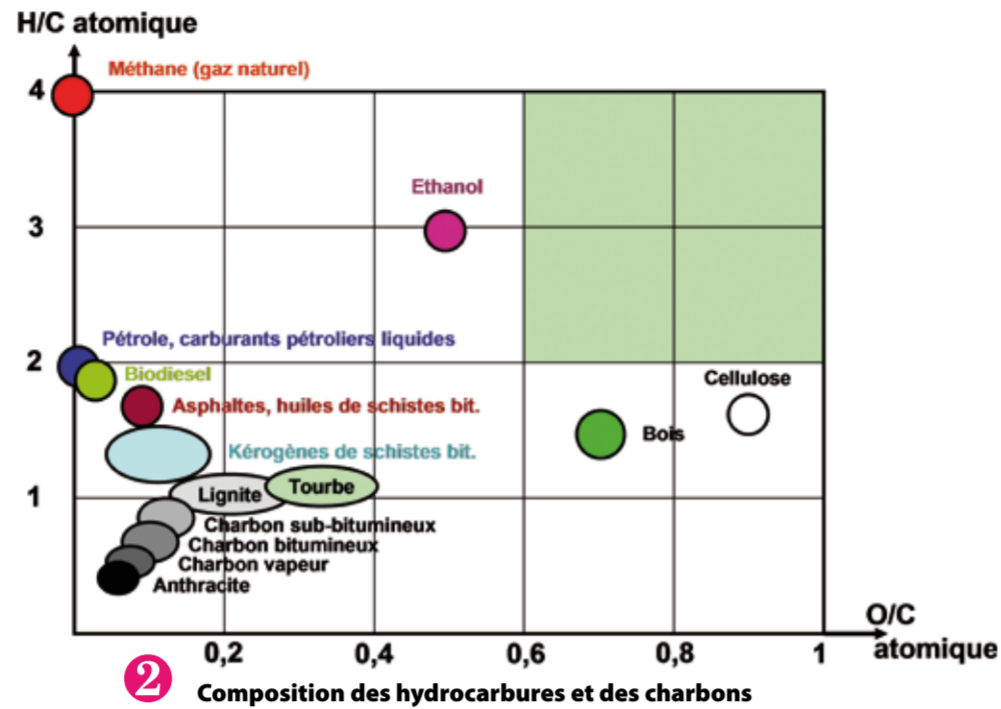
Les hydrocarbures liquides ou gazeux et les différents charbons résultent d'une première transformation de la biomasse par fermentation anaérobie, c'est-à-dire à l'abri de l'air. Ultimeurement, après enfouissement sous des dépôts sédimentaires, la biomasse, déjà transformée une première fois subit une seconde transformation sous l'effet combiné de la pression (due au poids des sédiments) et de la chaleur (en fonction de la profondeur de l'enfouissement). Cette seconde transformation aboutit aux différents hydrocarbures et aux charbons exploités de nos jours.

Au tout début de l'ère primaire, au Cambrien situé entre - 600 et - 500 millions d'années, une véritable explosion de la vie s'est produite. Dès cette période, une abondante biomasse s'est alors développée dans les océans sous forme de bactéries et de micro algues planctoniques. Au cours des ères géologiques successives, cette biomasse s'est accumulée au fond des océans, mélangée à des sédiments (argiles et marnes), elle a donné naissance aux hydrocarbures.

Ultimeurement, à partir de -450, -400 millions d'années, au Silurien puis au Dévonien, la présence de la vie ne se limite plus aux seuls océans. Progressivement la vie colonise les terres émergées, la végétation apparaît en premier, avant la faune. A la fin de l'ère primaire, au Carbonifère et au Permien, la luxuriance de cette végétation devient telle qu'elle sera à l'origine, après enfouissement, de la formation d'immenses gisements de charbon.

1 Cooksonia paranensis Gerrienne

Actuellement, pétrole, gaz et charbon contiennent de se former à partir des débris de la biomasse contemporaine issus du monde végétal et animal ... mais ces ressources ne seront pas disponibles avant quelques dizaines ou centaines de millions d'années ! Il nous faudra donc être raisonnable, nous contenter et prendre grand soin de ce que le passé nous a légué...



2) Classification des énergies fossiles

2-1 LEURS STRUCTURES DE LA PLUS SIMPLE À LA PLUS COMPLEXE

Tout comme la biomasse dont ils sont issus, les hydrocarbures et le charbon sont essentiellement constitués d'atomes de carbone, d'hydrogène et, mais en moindres proportions, d'atomes d'oxygène, d'azote et de soufre.

Les atomes de carbone constituent toujours « l'ossature » des molécules des divers composants que l'on trouve dans les hydrocarbures et les charbons. Les autres atomes, hydrogène, oxygène, azote, soufre... s'articulent tous autour de cette ossature de carbone pour former des chaînes plus ou moins longues et complexes, voir à ce sujet le chapitre relatif à la « Biomasse » et à ses annexes.

Le diagramme de la figure 2 indique, pour les molécules d'hydrocarbures liquides ou gazeux et les charbons, le rapport « H/C » entre le nombre des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) contenus dans ces molécules ainsi que le rapport « O/C » entre le nombre des atomes d'oxygène (O) et de carbone (C).

+ Pour en savoir plus Composition des hydrocarbures et des charbons

La lecture du diagramme de la figure 2 s'effectue ainsi : en ordonnée figure le rapport H/C, nombre d'atomes d'hydrogène (H) et de carbone (C), en abscisse le rapport O/C, nombre d'atomes d'oxygène (O) et de carbone (C)

Exemple : le méthane (point rouge), composant majeur du gaz naturel, est le plus simple et le plus abondant de tous les hydrocarbures. Sa molécule (CH₄) contient un atome de carbone quatre d'hydrogène, aucun atome d'oxygène. Le rapport H/C du méthane est égal à 4 et le rapport O/C est égal à 0. La position du méthane sur le diagramme est figuré par le point rouge dont les coordonnées sont H/C=4 et O/C=0.

Pour les molécules plus complexes, pour les charbons, les lignites, le bois et la cellulose, le diagramme indique les proportions entre ces trois atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

+ Composition des hydrocarbures et des charbons

On remarquera sur le diagramme de la figure 2 que tous les carburants pétroliers légers liquides (point bleu foncé) ont un rapport H/C égal à 2 et un rapport O/C égal à zéro, ce qui signifie que l'oxygène n'entre pas dans la composition de leurs molécules. Il sera expliqué ci-après que c'est précisément cette absence d'oxygène dans les roches sédimentaires au sein desquelles des hydrocarbures se sont formés qui est la condition déterminante et « sine qua non » de la formation par fermentation anaérobie de ces hydrocarbures.

On remarquera également que lorsque le rapport H/C (nombre d'atomes d'hydrogène par rapport au nombre d'atomes de carbone) diminue les hydrocarbures passent progressivement

2-2 LE GAZ NATUREL

Les gisements de gaz naturel contiennent essentiellement du méthane dont la molécule, CH₄, est constituée d'un atome de carbone central auquel sont liés quatre atomes d'hydrogène.

Le méthane est le plus simple des hydrocarbures

2-3 LES PÉTROLES ET LES GAZ DE PÉTROLE

A l'état naturel, le pétrole brut est un liquide brun plus ou moins visqueux, voire pâteux, parfois même solide. Le pétrole brut est un mélange de deux types de composés chimiques :

- les **hydrocarbures**, ce sont des édifices moléculaires de relativement petite taille, ils sont qualifiés de « produits légers ». Ils sont constitués de molécules ne contenant que des atomes de carbone et d'hydrogène, ils ont un rapport H/C égal ou inférieur à 3 et un rapport O/C=0.

Les plus légers, l'éthane C₂H₆, le propane C₃H₈ et le butane C₄H₁₀, sont gazeux dans les conditions normales de températures et de pression. Ils sont obtenus lors du raffinage du pétrole brut, d'où leur nom commercial de gaz de pétrole.

Lorsque le nombre d'atomes de carbone augmente au-delà de 4 (au-delà du butane), les hydrocarbures deviennent liquides dans les conditions normales. L'octane est le composant prépondérant de l'essence automobile, il contient 8 atomes de carbone et 18 d'hydrogène.

- les **produits lourds, huiles lourdes, bitume, asphaltes et résines**.

Les produits lourds sont des édifices moléculaires de grande taille qui, en plus des atomes de carbone et d'hydrogène toujours majoritaires, contiennent en quantité variable des atomes d'oxygène, d'azote et de soufre. Le pétrole est d'autant plus visqueux que ces trois éléments (oxygène, azote, soufre) rencontrés couramment dans le monde végétal sont abondants.

Les huiles lourdes et visqueuses constituent des réserves colossales qui étaient considérées jusqu'à présent comme une ressource difficilement exploitable, d'où le nom de « non conventionnelles » donné à ces réserves estimées à au moins la moitié des réserves conventionnelles de pétrole actuellement identifiées.

de l'état gazeux (méthane) à l'état liquide en passant par des gaz facilement liquéfiables (éthane, butane, propane). Lorsque le rapport H/C devient inférieur à 2 ces liquides deviennent de plus en plus visqueux (asphalte, huiles lourdes et bitumes...). Finalement, lorsque le rapport H/C devient égal ou inférieur à 1, les composés carbonés deviennent solides. Ce sont les différents charbons dont la consistance en fonction de leur teneur en humidité s'apparente plus ou moins à celle des roches. L'antracite pour lequel le rapport H/C est le plus faible est presque uniquement composé d'atomes de carbone, il a la consistance d'une roche.

Utilisation, consommation - Le pétrole - Le gaz naturel - Le charbon

Les huiles lourdes se présentent à la surface des sols sous forme de suintements : sables asphaltiques ou bitumineux. Lorsqu'elles sont en profondeur (schistes bitumineux), du fait de leur viscosité ces huiles sont très difficiles à extraire et doivent être au préalable fluidisées par chauffage ou dissolution.

L'exploitation de ces réserves n'en est qu'à ses débuts, elle s'avère complexe, délicate et nécessite encore la mise au point de nouvelles technologies d'exploitation et de raffinage. Elle est très polluante et reste de ce fait très controversée, le raffinage de ces huiles lourdes par « craquage » est par ailleurs difficile.

2-4 LES CHARBONS

Pour les charbons, le rapport H/C est inférieur à 1. Les charbons provenant de la transformation de la matière végétale (dont la composition varie entre celle de la cellulose et celle du bois) ont une composition chimique beaucoup plus complexe que les hydrocarbures. Les points sont gris pour les charbons les plus récents et les moins matures (tourbe et lignite) et noir pour les charbons les plus anciens (anthracite).

3) La formation des hydrocarbures

3-1 LE PROCESSUS DE FORMATION

La plupart du temps, après la mort de la biomasse (plancton, animaux, plantes, arbres...), les débris de matière animale, végétale, cellulosique ou ligneuse, se décomposent par fermentation aérobie en présence de l'oxygène de l'air. La décomposition par fermentation aérobie de ces débris de biomasse restitue rapidement à l'atmosphère le gaz carbonique et l'eau qui avaient été captés et mobilisés pour leur formation par photosynthèse. De ce fait on retrouve rarement et peu de débris végétaux solides dans les sédiments, ces débris ont généralement été décomposés sous forme soit de gaz carbonique et d'eau soit de méthane avant d'avoir pu être profondément enfouis.

Cependant, dans certaines conditions très particulières, au fond de certains lacs, des mers ou des océans ou dans les grands deltas, il peut arriver que des débris de matière organique puissent se déposer et s'accumuler à l'abri de l'oxygène de l'air, il se crée alors des dépôts sédimentaires riches en matière organique. Ces dépôts vont constituer la « **roche-mère** » au sein de laquelle, au cours des âges géologiques, la matière organique va progressivement se transformer. Selon la nature des débris, les conditions de pression et de température liées à la profondeur de l'enfouissement des sédiments, la matière organique va avec le temps se transformer en pétrole, en gaz ou en charbon.

Certaines périodes géologiques ont été particulièrement propices à la formation de tels dépôts. Par exemple, pour le charbon, durant l'ère primaire, la période située entre -359 et -299 millions d'années a connu une flore luxuriante qui a permis l'accumulation dans des conditions propices d'importants dépôts qui ont donné nais-

sance aux colossales réserves de charbon que l'on exploite aujourd'hui. D'où le nom de cette période : le « **Carbonifère** ».

3-2 LES ROCHES-MÈRES

Les gisements de pétrole ou de gaz sont toujours étroitement associés à l'existence passée de bassins sédimentaires ou de dépressions à la surface de la croute terrestre.

Au cours des temps géologiques ces dépressions ont souvent été occupées par des lacs, des mers ou des océans souvent peu profonds au sein desquels vivait une importante quantité d'organismes sous forme de plancton et de micro algues mono ou pluricellulaires.

Après leur mort ces organismes planctoniques s'accumulent sur les fonds marins et se mélangent à d'autres dépôts minéraux, argiles ou marnes, amenés par les rivières et les fleuves. Sous certaines conditions ce dépôt sédimentaire, mélange de minéraux et de matière organique, peut constituer une roche mère au sein de laquelle du pétrole et du gaz pourront ultérieurement se former.

3 Micro-algue bicellulaire

Les conditions minimales à remplir pour créer une roche-mère sont les suivantes :

- la masse des éléments organiques présents dans le dépôt sédimentaire doit, au minimum, être supérieure à 2 % de la masse totale du dépôt,

- la matière organique ne doit pas avoir été consommée par les animaux benthiques vivant dans les fonds marins (crustacés, vers, coquillages...),

- la matière organique doit être préservée de la présence d'oxygène pour éviter toute fermentation par des bactéries aérobies, ce qui aurait pour effet de la décomposer en eau et en gaz carbonique. Le milieu sédimentaire dans lequel la matière organique s'accumule doit donc être un milieu « réducteur » ou « anoxique », quasiment dépourvu d'oxygène.

Si, à raison de quelques millimètres par an, les dépôts peuvent s'accumuler pendant plusieurs dizaines de millions d'années, ces dépôts se recouvrent mutuellement et s'enfoncent sous l'action de leur propre poids (subsidence) enfouissant la roche-mère de plus en plus profondément, couramment de plusieurs kilomètres. Au fur et à mesure de l'enfouissement la température de la roche-mère augmente (d'environ 30 °C par kilomètre d'enfoncement) ce qui a pour effet de modifier la structure des molécules constituant la matière organique initiale.

3-3 LA FORMATION DU PÉTROLE ET DU GAZ DANS LA ROCHE-MÈRE

Dans un premier temps, jusqu'à une profondeur d'enfouissement inférieure à 1000 m, c'est-à-dire jusqu'à une température inférieure à 60°C et dans un milieu privé d'oxygène, les bactéries anaérobies transforment la matière organique en **kérogène** (un précurseur du pétrole) et, en plus faible quantité, en méthane.

Au-delà, entre 1000m et jusqu'à 3500m de profondeur, à des températures comprises entre 100 et 150°C la température a pour effet de rompre

les liaisons chimiques des « grosses » molécules de kérogène. Ce phénomène a un nom : la « **pyrolyse** » ou « **craquage thermique** ». Par pyrolyse, les molécules de kérogène perdent une partie de leurs atomes d'oxygène, d'hydrogène et d'azote pour donner naissance à des molécules plus petites dont les chaînes carbonées sont plus courtes et plus simples. C'est ainsi qu'en profondeur se forment le pétrole brut et le gaz naturel, avec une production annexe de gaz carbonique, d'eau et d'azote provenant de la pyrolyse.

Plus la température atteinte par la roche-mère est élevée, plus la proportion de gaz formé par craquage sera importante. La plage de températures, la « fenêtre », de formation du pétrole se situe entre 60 et 130°C, celle de la formation des gaz s'étend de 130 à 250 °C, allant du butane (le plus lourd) au méthane (le plus léger) obtenu aux températures les plus élevées. La séparation entre les températures de formation du pétrole et celles des gaz n'est pas franchement tranchée, elle est progressive, c'est ainsi que la plupart des gisements contiennent à la fois du pétrole et du gaz.

Selon la nature des dépôts et la température atteinte au cours des transformations on obtient différents types de pétrole :

Le type I est obtenu à partir de restes de membranes bactériennes et d'algues unicellulaires vivant dans des lacs. Ce type de pétrole est d'excellente qualité, il n'est malheureusement pas très abondant (moins de 10% de la production).

Le type II est le plus abondant : c'est le pétrole de la Mer du Nord, du Venezuela, de l'Arabie Saoudite... Il s'est formé à partir de restes d'algues planctoniques marines.

Par opposition aux deux types précédents qui proviennent du plancton marin, le type III tout comme le charbon, a essentiellement été formé à partir de débris végétaux terrestres (feuilles, branches, troncs et herbacées). On rencontre ce type d'hydrocarbures dans les dépôts fossilisés des deltas des grands fleuves (delta du Niger...), généralement dans des dépôts sédimentaires de très forte épaisseur.

3-4 LA MIGRATION VERS LES RÉSERVOIRS D'HYDROCARBURES

L'existence d'une roche-mère n'est pas suffisante à elle seule, pour constituer un système pétrolier exploitable capable de recueillir puis de stocker du pétrole ou du gaz. Sous l'effet de la pression qui compacte la roche-mère et sous l'effet de la poussée engendrée par la différence de densité entre la roche, l'eau, le pétrole et les gaz, ces différents éléments vont se séparer de manière différenciée (comme l'eau et l'huile) et, si cela est géologiquement possible, migrer vers des roches plus poreuses situées au-dessus.

4 Gisement d'hydrocarbures : roche mère, réservoir et de couverture

Les éléments migreront d'autant plus aisément qu'ils sont moins denses, leur mobilité allant en décroissant depuis les gaz, le pétrole et finalement l'eau.

Les **roches drains ou réservoir**. Ce sont des roches poreuses (la porosité atteignant de 5 à 30% du volume de la roche) qui recueillent les gaz, les hydrocarbures et l'eau qui ont été expulsés de la roche mère. Ces roches poreuses ainsi que les accidents de terrain (discontinuités, failles et fracturations) constituent autant de systèmes de drainage qui participent à la remontée de ces éléments vers la surface par poussée d'Archimède et par capillarité.

Les **roches de couverture**. Ce sont des roches imperméables situées au-dessus et à l'aplomb des roches réservoirs. Deux cas se présentent : soit elles bloquent la remontée des hydrocarbures en les maintenant dans les roches réservoirs (création d'un gisement) soit elles facilitent leur remontée en les guidant vers la surface.

Dans le premier cas, si la roche de couverture comporte un pli ayant la forme générale d'un U renversé (un anticlinal), ce U renversé constitue un piège empêchant les hydrocarbures de poursuivre leur remontée (figure 4). Ce piège est un gisement à partir duquel il sera possible à l'aide de forages d'extraire les hydrocarbures restés emprisonnés dans la roche réservoir.

Dans le second cas, si les hydrocarbures, toujours guidés par une roche de couverture ne rencontrent aucun piège au cours de leur remontée, ils parviennent finalement jusqu'à la surface où en présence d'oxygène ils sont dégradés par oxydation et par altération bactérienne.

La partie gazeuse est évidemment perdue et dispersée dans l'atmosphère, quant à la partie liquide dégradée par les bactéries, elle devient extrêmement visqueuse et finit par constituer des accumulations imprégnant les roches et les sables affleurant (sables asphaltiques). Ces accumulations constituent les réserves considérables d'huiles lourdes et extra-lourdes de pétrole dit non-conventionnel.

4) La formation des charbons

Le terme « charbon » est un terme générique désignant les combustibles carbonés solides.

Les charbons proviennent de régions qui ont connu par le passé une très forte production végétale. Ils se sont formés par accumulation de matière végétale (arbres, fougères arborescentes des forêts houillères, mangroves, spores, feuilles, algues...) déposée sur place dans des bassins marécageux, comme par exemple les tourbières actuelles, ou qui a été transportée vers des lacs ou le delta des grands fleuves.

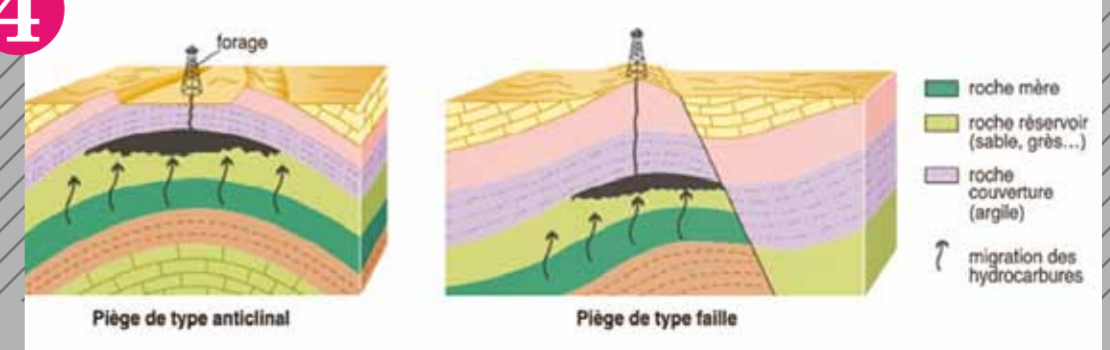
Tous ces dépôts ont été enfouis à l'abri de l'oxygène à des profondeurs variant de quelques centaines de mètres pour le lignite de formation relativement récente à plusieurs kilomètres pour les anthracites de formation beaucoup plus ancienne.

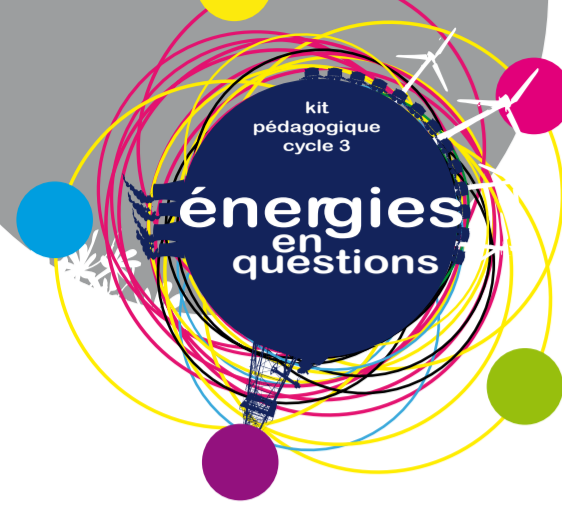
Durant l'enfouissement, par action des micro-organismes, le carbone sous sa forme organique (c'est-à-dire encore associé à l'hydrogène, à l'oxygène et à de l'humidité) a été progressivement transformé en carbone minéral. Ce processus de formation du charbon à partir des dépôts végétaux est la « **houillification** ».

3 Micro-algue bicellulaire (Actinoptychus)



4 Gisement d'hydrocarbures : roche mère, réservoir et de couverture





Simultanément, toujours sous l'effet de la pression, l'eau a été expulsée des dépôts et la matière subsistante s'est indurée devenant une véritable roche riche en kérogène. Pour donner une idée de cet effet, on estime, après compaction à 1 000 m de profondeur, qu'un dépôt de végétaux dont l'épaisseur initiale était de 10 m a été réduit à une veine de charbon de 1 à 2 mètres d'épaisseur !

Malgré le tri, une partie des minéraux reste encore intimement liée au charbon. Le charbon commercialisé contient en moyenne 15% de ces minéraux que l'on retrouvera après combustion sous forme de cendres ou sous forme de poussières émises avec les fumées.

Le charbon que l'on exploite s'est formé au cours des ères géologiques : 20% du charbon s'est formé au Carbonifère (de -359 à -299 Ma), 35% au Permien (de -299, à -251 Ma), 17% au Trias et au Jurassique (de -251, à -145 Ma), 13% au crétacé (de -145, à -65 Ma) et 13% durant l'ère Tertiaire (de -65, à -2,6 Ma).

De nos jours des gisements de charbon sont encore en cours de formation dans les marécages et les mangroves. Ce « charbon nouveau » en est au tout premier stade de sa houillification, et se présente sous forme de « **tourbe** ».

Le « **lignite** » de couleur noire ou brune est également un charbon en cours de formation, à un stade cependant plus avancé que celui de la tourbe. Il contient encore de la matière organique non entièrement transformée et de l'humidité. Dans les gisements de lignite on trouve souvent des lits de végétaux bien conservés.

A des stades de plus en plus avancés de la houillification on trouve successivement les **charbons sous-bitumineux, bitumineux** et finalement les **anthracites** qui sont parvenus au dernier stade de la houillification.

4-1 CLASSIFICATION DES CHARBONS

Les charbons sont classés selon leur intérêt énergétique. Les charbons de qualité (à coke, bitumineux et anthracite) représentent les trois quarts de la production mondiale. Les autres charbons, de moindre qualité, sont les charbons sub-bitumineux (10 %), le lignite (16%) et la tourbe (inférieure à 1%).

La tourbe est un matériau léger et spongieux qu'on l'extrait des dépôts marécageux. C'est un combustible peu énergétique de piètre qualité... sauf lorsqu'il est utilisé en Ecosse dans les distilleries de whisky !

Les lignites et les charbons les plus médiocres contiennent moins de 55% de carbone.

Les meilleurs charbons contiennent entre 70% et 90% (pour les anthracites) de carbone.

Outre sa qualité énergétique intrinsèque (reposant essentiellement sur la teneur en carbone), la qualité d'un charbon est également fonction des caractéristiques de la mine de laquelle il est extrait et de la teneur en éléments non combustibles qu'il contient.

Lors de l'extraction du charbon, les roches sédimentaires qui se sont déposées et accumulées en même temps que la matière végétale restent mêlées au charbon extrait : ce sont des stériles de compositions très diverses, silicates, grès, schistes... tous non combustibles. La teneur en stériles varie considérablement d'une mine à l'autre, elle est fonction de l'épaisseur et de la régularité des veines ainsi que du mode d'abatage et d'extraction du charbon. Les stériles sont séparés du charbon par un tri effectué dans des lavoirs à charbon, leur accumulation constitue les « **terrils** », ces monticules coniques en forme de volcan si caractéristiques du paysage des régions minières.

Utilisation, consommation

1) Introduction

Sur les trente dernières années, la demande mondiale d'énergie primaire a augmenté en moyenne de 1,7% par an, elle est ainsi passée de 7 milliards de tonnes équivalent pétrole (7 Gtep) en 1980 à 12 Gtep en 2009. Si cette croissance ne fléchissait pas, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit que la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 50% d'ici 2035. Cette croissance n'est pas uniforme, elle varie d'une région du Monde à une autre et n'est pas la même pour les diverses sources d'énergie primaire.

La plus forte croissance de la demande a été observée pour le charbon, notamment en Chine où certaines années, notamment entre 2002 et 2003 la progression a atteint un record, +20%.

Les demandes de pétrole et de gaz ont également connu une progression soutenue, au moins jusqu'à la survenue de la crise économique de 2008.

La figure 1 dresse pour l'année 2009 le bilan mondial de la demande d'énergie exprimée en millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) pour les différentes sources d'énergie primaire. Par rapport à la demande globale, ce bilan montre l'importance relative (en %) de chacune de ces sources en distinguant l'ensemble du monde, les pays de l'OCDE* et les pays ne faisant pas partie de l'OCDE.

1 Année 2009, consommation mondiale d'énergie primaire, par type d'énergie (en Mtep)

Les énergies fossiles, pétrole brut, gaz et charbon représentent à elles seules 81% des ressources primaires d'énergie de la planète.

* L'OCDE, l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques, comprend les pays les plus développés (sinon les plus riches) de la planète :

- En Europe, Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume Uni, Slovaquie, Suède, Suisse, Turquie.
- Hors d'Europe, Australie, Canada, Chili, Corée du Sud, Japon, Mexique, Nouvelle Zélande, USA.

Les énergies renouvelables se répartissent entre biomasse 1 230 Mtep, Hydraulique 280 Mtep, éolien, solaire géothermie 99Mtep.

A l'orée du XXIème siècle cette prédominance des énergies fossiles et le rythme de croissance de la demande, en particulier des pays émergents d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine, posent au moins deux problèmes fondamentaux :

a) Celui des ressources. Les ressources pétrolières, gazières ou charbonnières se sont progressivement formées au cours du temps, sur plusieurs centaines de millions d'années. La lenteur du rythme de leur production fait, qu'à l'échelle de la vie humaine, elles ne sont pas renouvelables, d'où leur qualification de « fossiles ». Chaque année l'Humanité consomme une quantité de ressources fossiles que la Terre a mis plus d'un million d'années à produire.

Sans parler de leur extinction, mais plutôt de leur raréfaction, les réserves vont inexorablement décroître, tout au moins pour les plus faciles d'accès.

Les approvisionnements deviendront de plus en plus difficiles et coûteux et seront, à n'en point douter, sources de tensions, voire de conflits pouvant s'étendre à l'échelle planétaire. Il suffit de regarder l'état actuel de certaines régions du monde, les tensions ou les conflits qui les bouleversent, pour s'en persuader.

b) Celui des rejets dans l'atmosphère. D'une manière ou d'une autre, toute utilisation à des fins énergétiques d'un hydrocarbure ou d'un charbon revient à les brûler intégralement, à produire par leur combustion de l'énergie, de la vapeur d'eau et du gaz carbonique. En moindres proportions, d'autres gaz peuvent également être émis, des oxydes d'azote, des gaz sulfureux... Actuellement la totalité des gaz émis par la combustion du pétrole, du gaz et du charbon sont rejetés dans l'atmosphère soit, et pour 2011, 32 milliards de tonnes par an pour le seul CO2.

Outre la pollution que ces gaz engendrent et les conséquences sanitaires de leur rejet sur le court terme, ces gaz participent à l'accroissement de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère terrestre. La nature est en effet dans l'incapacité d'absorber plus de la moitié de ce que la combustion des ressources fossiles rejette annuellement.

La teneur en CO2 de l'atmosphère est passée de 280 ppm (ppm : partie par million) à la fin du XIXème siècle à 390 ppm en 2011. L'augmentation de cette teneur connaît un rythme soutenu depuis les années 1970. Elle est régulièrement de 2 ppm par an et devrait s'accroître compte tenu des rejets de plus en plus importants effectués par les pays émergents (Chine, Inde, Indonésie...).

Face à ces émissions, la communauté internationale s'interroge sur les répercussions, voire les désordres, que l'accroissement de la teneur des gaz à effet de serre produira. Que pourrait-il se passer au cours de ce XXIème siècle ? Cet accroissement est-il de nature à engendrer une évolution des climats dont on ignore aujourd'hui quelle en sera l'ampleur et les effets ?

La majorité des scientifiques, dont ceux du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), prédit au cours de ce XXIème siècle un changement climatique important entraînant de graves perturbations sur les conditions de vie de la population mondiale si aucune mesure ne vient ralentir, voire inverser, la tendance actuelle. A minima ils proposent de ne pas dépasser une teneur en CO2 de 450 ppm

au cours du siècle afin de limiter l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe à environ 2 °C.

Ces mêmes scientifiques ont étudié plusieurs scénarios d'évolution des températures en partant de différentes hypothèses de consommation de ressources énergétique fossiles. Compte tenu des incertitudes sur les hypothèses et de l'imperfection des modèles de simulation, l'augmentation des températures à la fin du siècle serait comprise entre 1 et 6 °C. S'appuyant sur ces incertitudes (une incertitude n'étant pas une erreur mais la limite de nos connaissances !) d'autres scientifiques contestent ces prévisions et mettent en doute l'influence sur le climat des rejets des gaz à effet de serre générés par l'activité humaine.

Cependant, et sans prendre parti sur les conséquences de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz issus de la combustion des ressources fossiles, il est incontestable que leur teneur de plus en plus élevée augmentera l'opacité de l'atmosphère vis-à-vis du rayonnement infrarouge et, en conséquence, l'effet de serre global. C'est un phénomène physiquement incontestable, découlant de lois universellement établies, tout comme sont incontestables les observations du recul des glaciers, le recul de la banquise ou, en France, de l'avance de trois semaines à un mois des dates du début des vendanges par rapport à ce qu'elles étaient au milieu du XXème siècle.

2) Définitions, les ressources et les réserves

2-1 LE PASSAGE DES « RESSOURCES » AUX « RÉSERVES ».

Les énergies primaires fossiles sont extraites des gisements dont l'étendue, la qualité, l'accessibilité, les coûts d'exploitation... sont plus ou moins bien connus.

On définit deux notions distinctes : les « **ressources** » et les « **réserves** ». Ces deux notions sont souvent confondues, il est donc nécessaire de les préciser.

- Les **ressources** sont les quantités de matière qu'il est **à priori** possible d'extraire des gisements sous certaines conditions techniques et économiques qui doivent être précisées. Sans ces précisions techniques et économiques, la notion de ressource n'a guère de signification.

- Les **réserves** sont, parmi les ressources celles qui ont été évaluées de manière suffisamment précise et fiable, tant en quantité qu'en qualité, pour qu'il ait été jugé possible et rentable de les exploiter avec les moyens existants (ou des moyens dont on sait pouvoir disposer dans un avenir proche), en se référant au contexte des marchés et à leurs évolutions réalistes ou prévisibles.

On passe d'une ressource à une réserve en appliquant aux quantités contenues dans la ressource (ou le gisement) un « **taux de récupération** » inférieur ou au plus égal à 100%. Ce taux indique le pourcentage de matière contenue dans la ressource qu'il est techniquement et économiquement possible d'extraire de ce gisement. A une époque donnée, ce taux de récupération est essentiellement déterminé par les techniques disponibles et par les conditions économiques de l'époque (ou d'un futur proche... mais ni trop lointain ni trop incertain !).

A titre d'exemple, compte tenu des techniques actuelles et des coûts d'exploitation jugés acceptables par les marchés, le taux de récupération moyen des gisements de pétrole est de 30%, il est voisin de 80%, voire de 90%, pour le gaz naturel

Il est important de noter qu'un taux de récupération peut évoluer fortement, parfois même brutalement, en fonction de la conjoncture internationale, des progrès des techniques, des réglementations et en fonction de l'évolution des marchés.

Toujours à titre d'exemple, certains gisements de pétrole ou de gaz situés en mer profonde, les gisements de sables asphaltiques ou de gaz de schiste dont l'exploitation était par le passé jugée techniquement impossible ou non rentable, est aujourd'hui devenue tout à fait réalisable et économiquement viable... à défaut d'être acceptable aux yeux de certains protecteurs de l'environnement !

2-2 LES RESSOURCES

Parmi les ressources on distingue : Les **ressources conventionnelles** qui correspondent aux gisements qui sont ou seraient exploitables à l'aide des techniques d'extraction connues et actuelles, Les **ressources non conventionnelles** que l'on n'envisage pas actuellement d'exploiter pour diverses raisons.

Soulignons que ces notions de « conventionnel » ou de « non conventionnel » sont basées sur des critères techniques, économiques, environnementaux. Elles dépendent tout autant de considérations commerciales ou de politique intérieure ou internationale.

Un bon exemple de cette variabilité d'un Etat à un autre est l'exploitation des gaz de schiste. Cette exploitation n'est pas autorisée en France où le gaz de schiste est une ressource non conventionnelle, alors qu'elle l'est dans certains pays européens ou aux USA au même titre que l'exploitation du gaz naturel conventionnel.

2-3 LES RÉSERVES

Par ordre décroissant de confiance dans l'évaluation des quantités de matière renfermées dans une réserve et dans l'évaluation de la rentabilité de l'exploitation de cette réserve, on classe les réserves en :

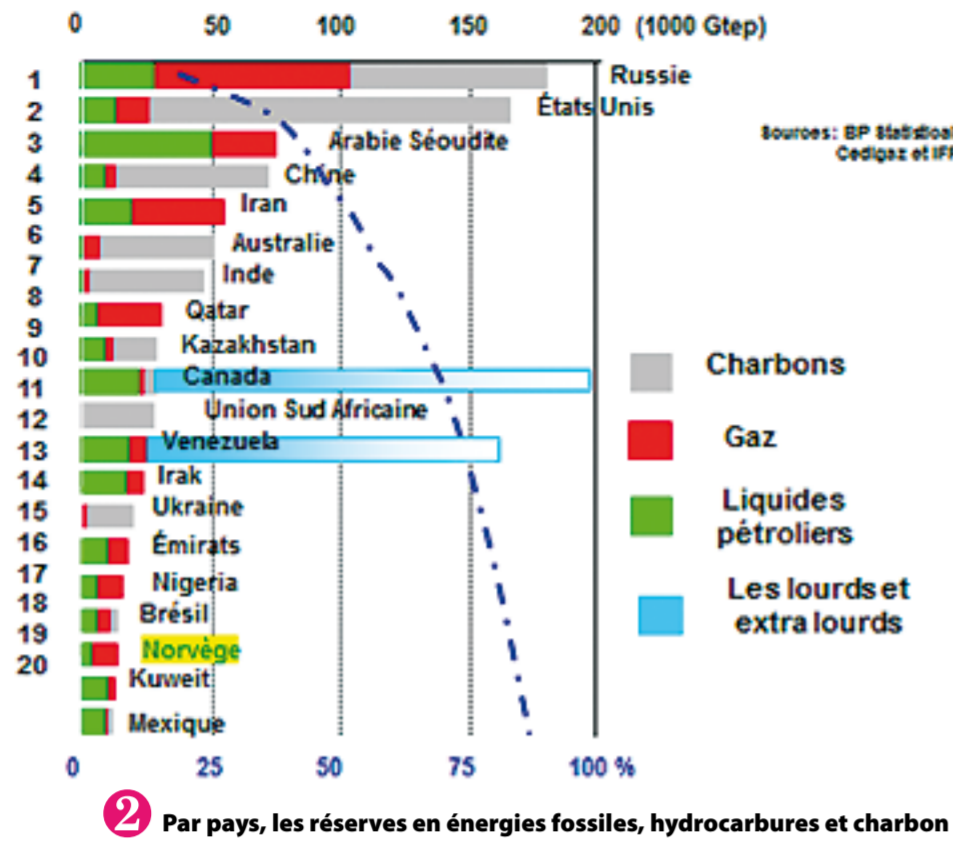
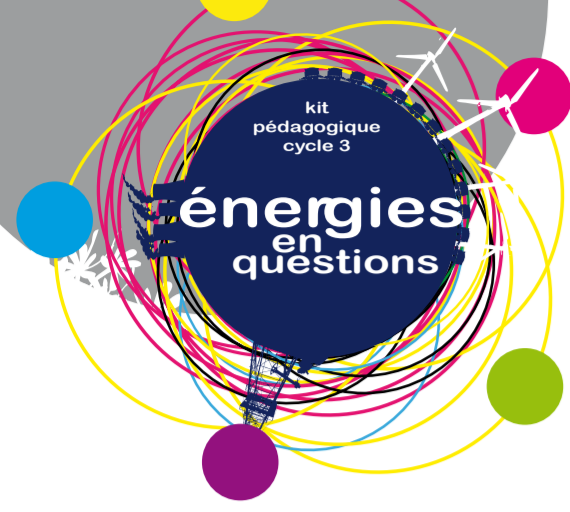
- **réserves prouvées.** Elles correspondent au niveau le plus élevé de certitude et de rentabilité. Les gisements classés dans cette catégorie de réserves sont identifiés et leur contenu (quantité et qualité) évalué avec une bonne précision. Les études géologiques ont estimé leur étendue et leur contenu avec une probabilité d'existence de 85 à 95%.

- **réserves probables.** Elles correspondent aux gisements prouvés exploitables dans des conditions techniques et économiques dont on estime qu'elles deviendront réalistes et acceptables dans un futur proche. La probabilité d'existence de ces réserves est de 50%.

- **réserves possibles** (que l'on qualifie parfois de potentielles hypothétiques et de potentielles spéculatives). Elles correspondent aux matières « récupérables » à partir des gisements « prouvés » ou « probables » dans des conditions économiques et techniques incertaines ou non encore connues. La probabilité de leur existence est faible, de 5 à 10%.

1 Année 2009, consommation mondiale d'énergie primaire, par type d'énergie (en Mtep)

Source d'énergie primaire	Consommation	% monde	% OCDE*	% non-OCDE
Charbon	3 294 Mtep	27	25,2	23,2
Pétrole brut	3 987 Mtep	33	26,8	40,0
Gaz naturel	2 539 Mtep	21	24,3	19,2
Nucléaire	703 Mtep	6	15,3	1,6
Énergies renouvelables**	1 609 Mtep	13	8,4	16
TOTAL	12 132 Mtep			



- On définit enfin, de manière globale, les **réserves espérées**. Ces réserves sont la somme des trois précédentes en affectant le coefficient 1 aux réserves prouvées, 2/3 ou 1/2 aux réserves probables et le coefficient 1/3 ou 1/4 aux réserves possibles.

Face aux multiples incertitudes que comporte l'évaluation des réserves, cette petite cuisine qui conduit à l'évaluation des réserves espérées n'est pas plus mauvaise qu'une autre !

2-4 EN CONCLUSION

a) À titre purement indicatif, il est possible d'effectuer un petit calcul, pour chaque ressource primaire d'énergie fossile, pétrole, gaz et charbon : diviser l'estimation la plus probable des réserves prouvées par la consommation mondiale annuelle de cette ressource au rythme actuel. De ce calcul ne retenons que les ordres de grandeurs :

Ressource	Réserves prouvées divisées par la consommation annuelle
Pétrole	45 ans
Gaz	65 ans
Charbon	250 ans
Tous fossiles confondus	115 ans

b) Quelques remarques :
- en Europe, le pays possédant les plus importantes réserves prouvées d'énergie fossile est la Norvège. Dans le classement mondial elle n'arrive toutefois qu'en... vingtième position (figure 2) ! En matière d'énergie, l'Europe n'est donc pas très bien lotie, d'où sa dépendance vis-à-vis du reste du Monde,

- malgré leur importance et la certitude de leur existence, les réserves non conventionnelles de pétroles lourds et extra lourds du Canada et du Venezuela (figure 2 en bleu clair) ne sont pas prises en compte dans l'évaluation des réserves prouvées.

- Il en est de même pour les réserves, non conventionnelles, de gaz de schiste, elles ne sont actuellement pas comptabilisées dans les réserves prouvées.

En 2012 les réserves de gaz de schiste ont été évaluées à plus de 150 000 milliards de mètres cube, avec des « poids lourds » (exprimées en milliards de m³) que sont la Chine (36 000), les USA (25 000), l'Argentine (22 000), le Mexique (20 000). Les réserves françaises sont évaluées à 5 100 milliards de m³ correspondant à environ un siècle de consommation au rythme actuel.

Il est fort probable que dans les années à venir les ressources non conventionnelles de pétrole et de gaz entreront, sans distinction, dans la comptabilisation des ressources mondiales. Il est par contre certain que l'exploitation intensive des ressources non conventionnelles de pétrole et de gaz modifiera profondément le contexte énergétique actuel qui repose encore sur la prééminence des pays du Moyen Orient.

Les USA relocalisent actuellement une partie de leurs industries métallurgiques et chimiques grâce à l'exploitation intensive des gaz de schiste avec la création à terme d'un million d'emplois. Cette relocalisation des emplois a été placée au centre de la campagne de l'élection présidentielle américaine de 2012.

- La troisième remarque a trait à l'importance considérable des réserves de charbon dans le sous-sol des trois géants que sont les USA, la Russie et la Chine.

3) L'accroissement des besoins et de la demande

Le scénario consistant à « laisser faire ».
La demande mondiale d'énergie primaire, plus de 12 milliards de tep par an, est actuellement couverte pour plus de 80% par des combustibles fossiles. Les hydrocarbures (pétrole et gaz) représentent les deux tiers de la participation des énergies fossiles, le charbon fournissant le troisième tiers.

Dans un scénario dit de « laisser faire », où chaque pays effectuerait ses choix énergétiques uniquement en fonction de ses seuls intérêts, indépendamment de toute contrainte (en particulier environnementale) et sans se préoccuper de la sécurisation de ses sources d'approvisionnement sur le long terme, les simulations montrent que la demande globale d'énergie primaire passerait de 12 Gtep à 13 ou 15 Gtep à l'horizon 2020, dont 7 à 9 Gtep pour les seuls hydrocarbures, pétrole et gaz. A ce rythme, en 2020, la moitié (et non la totalité) des réserves prouvées de pétrole actuellement en exploitation serait consommée ainsi que le tiers des réserves prouvées de gaz.

Le charbon, dont les réserves sont probablement cinq à six fois plus élevées que les réserves réunies de pétrole et de gaz, pourrait se substituer aux hydrocarbures, essentiellement pour la production d'électricité. À production d'électricité égale cette substitution par le charbon aurait pour effet de multiplier par deux les émissions de CO2 actuelles. Dans un tel scénario, d'ici à 2020, les émissions de CO2 passeraient de 32 milliards de tonnes à 44 milliards de tonnes par an.

À plus long terme, toujours selon un scénario de « laisser faire », en 2050, la demande annuelle d'énergie primaire pourrait atteindre 25 Gtep (milliards de tep), soit le double de la demande actuelle, dont 8 à 12 Gtep pour le pétrole et le gaz.

À elles seules, les ressources conventionnelles et prouvées de pétrole ne permettraient pas de répondre à une telle demande, elles auraient été épuisées avant. Quant au gaz, ces mêmes ressources conventionnelles et prouvées permettraient tout juste d'atteindre 2050.

Force est alors de constater que pour atteindre la fin du siècle, outre une amélioration du taux de récupération des gisements à laquelle il sera très certainement fait appel, il faudra nécessairement avoir recours aux ressources d'hydrocarbures aujourd'hui encore appelées (mais pour combien de temps encore ?) non conventionnelles ; schistes asphaltiques, bitumineux, hydrates de méthane (voir, au chapitre « gaz naturel », le paragraphe consacré aux « hydrates de méthane »).

L'exploitation des ressources non conventionnelles a déjà débuté. Par exemple, aux États Unis pour le gaz de schiste, au Canada et au Venezuela pour les huiles lourdes, au Japon ou au Canada où des recherches sont menées pour étudier une éventuelle utilisation des hydrates de méthane, océaniques ou terrestres.

Un scénario plus volontariste mais...

Il suppose qu'à partir de 2020 la demande en hydrocarbures se soit stabilisée au niveau de la demande actuelle, c'est-à-dire à 9 Gtep. Un tel scénario nécessite une diminution drastique de la demande des pays industrialisés de l'OCDE au profit des pays émergents dont la demande sera inéluctablement en forte croissance. Ce scénario ne correspond manifestement à aucune tendance constatée à ce jour. Suite à l'enthousiasme des rendez-vous des années 90 à Rio ou à Kyoto, les piètres résultats obtenus (pour ne pas dire l'absence de résultat concret) lors des grands rendez-vous mondiaux les plus récents à Johannesburg, à Copenhague, à Durban ou à Doha... n'incitent pas à l'optimisme quant à la volonté de la majorité des pays de s'engager dans des politiques de modération de leur consommation énergétique, de leur consommation d'hydrocarbures, de gaz tout particulièrement.

Le pétrole

1) Le pétrole en quelques chiffres

Le pétrole est extrait du sous-sol au moyen de puits forés. A travers le monde, près d'un million de puits productifs sont en exploitation.

La production de ces puits est très variable, de quelques barils par jour à plus de 300 000 barils, un baril étant équivalent à 158,8 litres ou à 0,1357 tonnes de pétrole brut de densité 0,855.

La production à terre représente les 2/3 de la production mondiale et la production en mer (production off-shore) représente le solde, soit 1/3. La production off-shore est en rapide croissance, en Europe elle représente même la quasi-totalité de la production (Mer du Nord).

La **production mondiale annuelle** de pétrole est actuellement de **4 milliards de tonnes**. La contribution des pays de l'OPEP à la production mondiale est de 40%.

Le Moyen-Orient représente 30% de la production, la seule Arabie Saoudite 16%.

2) Les réserves

2-1 L'ÉVALUATION DES RÉSERVES MONDIALES DE PÉTROLE

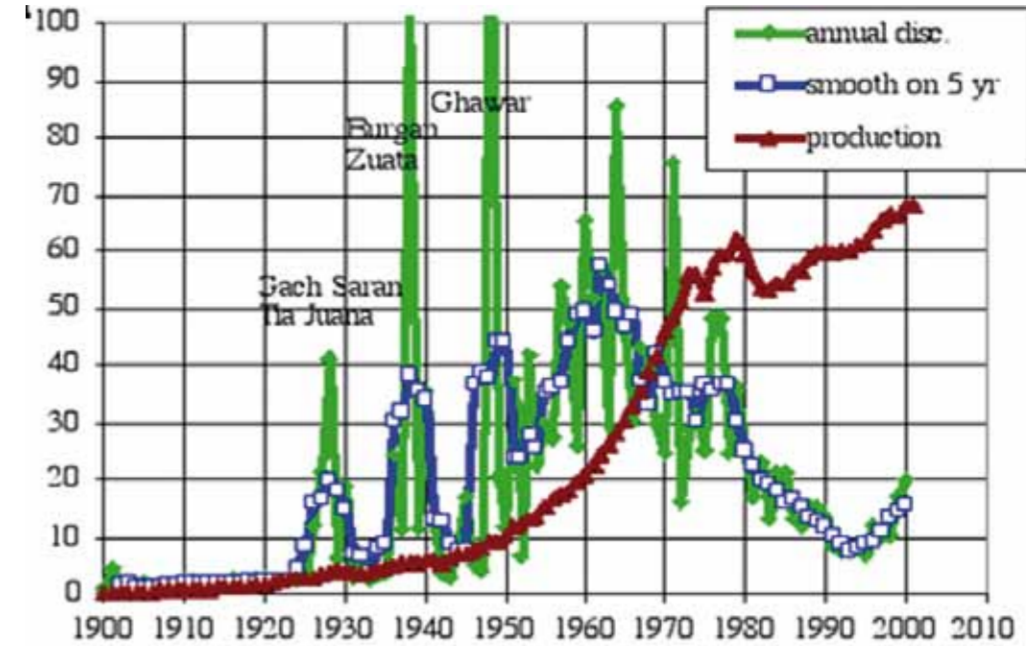
L'évaluation des réserves fait l'objet de controverses entre « experts ».

Après un pic de production qu'ils situent entre 2015 et 2025, les « experts pessimistes » prévoient une décroissance de la production de pétrole conventionnel. Quant aux « experts optimistes », se fondant sur l'abondance des ressources de l'« off-shore très profond » (entre 2000 et 3000m), sur l'évaluation des réserves non conventionnelles (schistes bitumineux et sables asphaltiques) et sur un meilleur taux de récupération du pétrole, ils reportent ce pic au-delà... sans en préciser l'échéance.

Pour une multitude de raisons, techniques, politiques, financières, spéculatives... et bien d'autres encore, il est extrêmement difficile de disposer de données précises et fiables concernant les réserves de pétrole. Les difficultés proviennent de l'importance stratégique de ces données et du fait que, dans leur élaboration, il intervient une grande part d'intoxication réciproque entre les pays producteurs, les compagnies, nationales ou multinationales, les milieux financiers, les bourses et l'innombrable armée des intermédiaires en tous genres qui gravitent autour des marchés.

Nous ne trancherons pas ici le débat sur la fin des réserves ni celui de la date à laquelle se situera le « pic de production pétrolière »... ni même celui de savoir s'il existera jamais un tel pic !

Hors de l'intoxication et de la spéculation il est cependant possible de préciser les deux points suivants :



1 Découverte de nouveaux gisements et production (en milliard de barils)

- le point de vue financier. Lorsque l'on parle de réserves, il doit toujours être fait référence au prix que l'on accepte de payer pour accéder au pétrole de ces réserves. En exagérant (mais à peine !) le pétrole à 10 \$ le baril est totalement épuisé, en revanche le pétrole à 200-300 \$ le baril, ou plus, il y en existe encore énormément dans le sous-sol ! A un instant donné, l'évaluation des réserves s'établit essentiellement en fonction des coûts d'exploitation (recherche, extraction, royalties...) et des prix du marché.

- le point de vue technique. Aujourd'hui, compte tenu des technologies, on ne sait récupérer en moyenne qu'un tiers du pétrole contenu dans un gisement, les deux autres tiers restant prisonniers de la roche réservoir. Lorsque la pénurie se fera réellement sentir, il est probable qu'on saura mettre en œuvre les moyens permettant d'aller chercher l'autre partie du pétrole, celle restée en place... mais à quel prix ? A un prix certainement plus élevé !

De la réponse à ces deux principales interrogations financières et techniques dépend l'évaluation des réserves.

La seule certitude que l'on puisse avoir quant aux réserves, est que le rythme des découvertes de nouveaux gisements se ralentit (voir figure 1, courbes vertes et bleues).

Si dans les années 1970, pour un baril consommé on découvrait cinq nouveaux barils, on constate qu'aujourd'hui on consomme six barils tandis qu'on n'en découvre plus qu'un.

Lère des découvertes de champs géants (Ghawar en Arabie Saoudite, Kirkuk en Irak, Cantarell au Mexique...) semble révolue.

Commentaires de la figure 1 : en vert, les gisements découverts, en bleu le rythme des découvertes lissé sur une période de 5 ans, en brun la courbe de la consommation mondiale.

Jusqu'à présent, l'un des principaux problèmes du secteur pétrolier était de savoir à quelle échéance le pic de la production mondiale, annonciateur d'une décroissance inéluctable, allait se produire.

Région	Gt	%
Amérique du Nord	8	5
Amérique Latine	14,4	9
Europe et Eurasie	19	12
Afrique	14,9	9
Moyen-Orient	100	62
Asie et Océanie	5,5	3
TOTAL Monde	158,1	100

4 Répartition des réserves prouvées de pétrole en milliard de tonnes. BP, juin 2005

3) Le pétrole conventionnel, production, consommation, transport

En 2012, la répartition de la production pétrolière est encore le reflet de la répartition des réserves prouvées avec une prééminence du Moyen-Orient et des producteurs de l'OPEP.

Les quinze premiers producteurs mondiaux (figure 5) s'ajoutent 76% de la production totale, dont 40% pour ceux de l'OPEP.

Quant aux pays de l'OCDE ils ne participent à la production mondiale qu'à hauteur de 27% bien qu'ils consomment 62% de cette production (25% pour les États Unis et 17% pour l'Europe).

Producteurs (2006)	Mt	%	Exportateurs MT	Importateurs Mt
Arabie S	507	12,9	Arabie S	364
Russie	477	12,1	Russie	253
USA	310	7,9	Iran	132
Iran	216	5,5	Nigeria	119
Chine	184	4,7	Norvège	115
Mexique	183	4,6	Mexique	100
Canada	151	3,8	Vénéz.	97
Venezuela	151	3,8	Emirats	97
Koweït	139	3,5	Koweït	84
Emirats	134	3,4	Canada	84
Autres	1484	37,8	Autres	733
Monde	3936	100	Autres	709

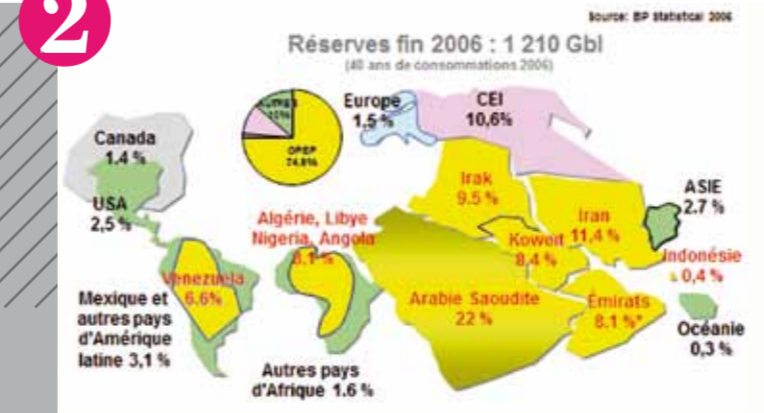
2 Répartition des réserves prouvées de pétrole (en % du total des réserves prouvées)

3 Répartition des réserves prouvées par région productrice (en milliards de barils)

Fin 2005 les réserves prouvées de pétrole s'élevaient à environ 160 milliards de tonnes (Gt), 70% d'entre elles se situent à terre (on-shore) et 30% en mer (off-shore).

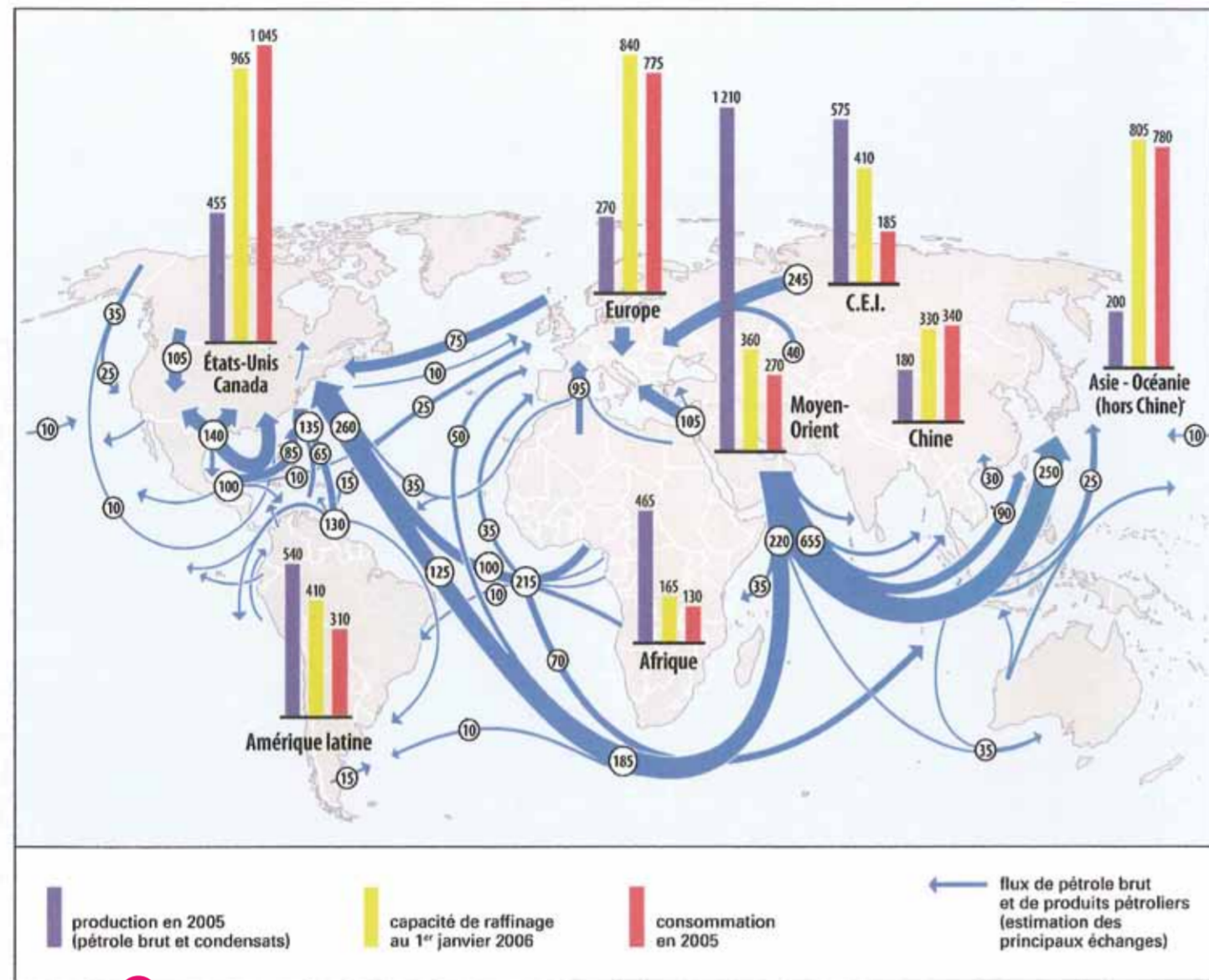
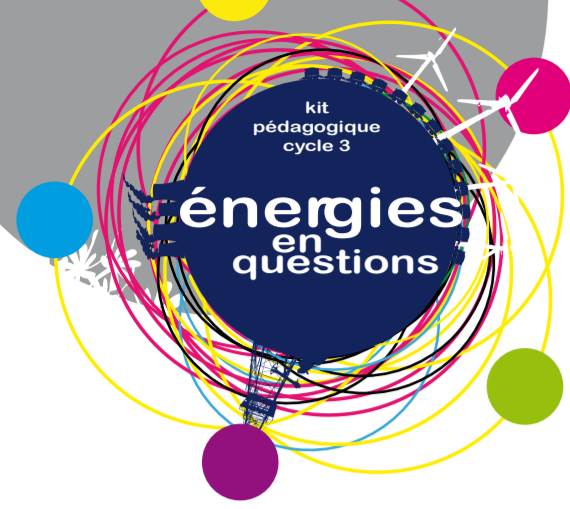
Selon les estimations de la compagnie BP, elles représenteraient 40 années de consommation au rythme de la consommation de l'année 2006.

2 Répartition des réserves prouvées de pétrole (en % du total des réserves prouvées)



3 Répartition des réserves prouvées par région productrice (en milliards de barils, 1 baril correspond à 0,1357 tonne de pétrole)





La figure 6 illustre le colossal déséquilibre existant aujourd'hui entre les régions productrices et les régions consommatrices. Elle illustre l'importance des échanges de produits pétroliers à travers le monde. Les principaux flux de transport sont ceux qui relient le Moyen-Orient aux États-Unis et au Sud-Est asiatique (Chine, Corée du Sud et Japon) via le Golfe persique et le détroit d'Ormuz, ceux qui relient le Golfe du Mexique et le Canada aux USA et ceux reliant la CEI à l'Europe occidentale.

4) Les réserves d'hydrocarbures liquides non conventionnels

4-1 LES HUILES LOURDES

Les hydrocarbures non-conventionnels sont des « huiles lourdes et extra-lourdes » extrêmement visqueuses extraites des sables asphaltiques. Les réserves de ces hydrocarbures non conventionnels sont énormes, elles aiguisent évidemment bien des convoitises... d'autant qu'elles sont situées hors du Moyen-Orient. Bien que délicates et complexes, les techniques d'extraction sont connues.

On estime ces réserves non conventionnelles à environ 350 milliards de tonnes au Canada (Athabasca) et à 200 milliards de tonnes au Venezuela (Bassin de l'Orénoque). D'autres dépôts, sans doute moins importants mais significatifs, existent dans d'autres régions du monde. Ces pétroles lourds et visqueux sont issus de pétroles qui n'ont pas rencontré de roches réservoir profondes et qui ont pu de ce fait remonter jusqu'en surface (Canada) ou au voisinage de la surface (Venezuela). Ces huiles ont été altérées par l'oxygène contenu dans les eaux de surface et par des bactéries, leur altération explique leur viscosité.

Ces immenses réserves sont-elles exploitables et dans quelles conditions ? En réalité elles ne le sont qu'assez difficilement du fait de l'extrême viscosité des huiles qu'il faut fluidifier en augmentant leur température avant de pouvoir les recueillir, par exemple par injection de vapeur dans les puits. Ces opérations sont lourdes, complexes et polluantes, elles mobilisent de vastes territoires, généralement vierges, souillent les sols et contaminent les cours d'eau et les nappes...

Finalement, au niveau mondial, et vu d'aujourd'hui, le total des huiles lourdes et extra-lourdes réellement récupérables ne serait que de 80 milliards de tonnes.

Notons que la mise en exploitation des gisements de ces huiles lourdes rencontre de plus en plus d'opposition du fait précisément de leur impact environnemental. Malgré ces inconvénients, certains pays gros consommateurs se sont engagés dans leur exploitation.

Au premier rang de ces pays, le Canada qui exploite ses sables asphaltiques à ciel ouvert. Pour exploiter ses réserves d'huiles, le Canada avait décidé de se retirer du protocole de Kyoto...

D'autres pays se sont lancés dans l'exploitation des huiles. Citons parmi eux, la Jordanie et l'Estonie qui produit actuellement 90% de son électricité à partir d'huiles lourdes...

4-2 LES SCHISTES BITUMINEUX

Les schistes bitumineux constituent une autre ressource non conventionnelle d'hydrocarbures. Ces schistes sont des roches riches en kérogène (le précurseur du pétrole) dont l'enfouissement (et donc la température) n'a pas été suffisant pour aboutir naturellement à la formation de pétrole. Pour transformer le kérogène en hydrocarbures utilisables, il faut effectuer ce que la nature n'a pas fini d'accomplir.

À partir du kérogène contenu dans les roches schisteuses, on obtient des hydrocarbures liquides par **pyrolyse** (par montée en température). **L'huile de schiste** obtenue est un simili-pétrole de qualité plutôt médiocre.

Les schistes bitumineux sont une ressource potentiellement importante mais les procédés d'extraction auxquels on a actuellement recours (forages horizontaux puis fracturation hydraulique...) restent économiquement peu intéressants et s'avèrent polluants.

4-3 LES AUTRES RESSOURCES, BILAN PROSPECTIF

À côté des réserves de pétrole non conventionnelles identifiées, et en plus des réserves prouvées, d'autres ressources existent. Ce sont les ressources dites hypothétiques :

- ce sont des gisements que l'on escompte découvrir à l'aide de nouvelles méthodes de prospection, sans cependant pouvoir estimer le coût de l'extraction du pétrole de ces gisements. Ces ressources sont estimées à 100 milliards de tonnes,

- aux ressources restant à découvrir, s'ajoute le pétrole qu'il serait possible de récupérer à partir des gisements en déclin ou épuisés grâce à de nouvelles technologies, (injection de gaz, d'eau de mer ou de vapeur, utilisation de solvants, fragmentation hydraulique... etc.) Ces réserves seraient également de 100 milliards de tonnes.

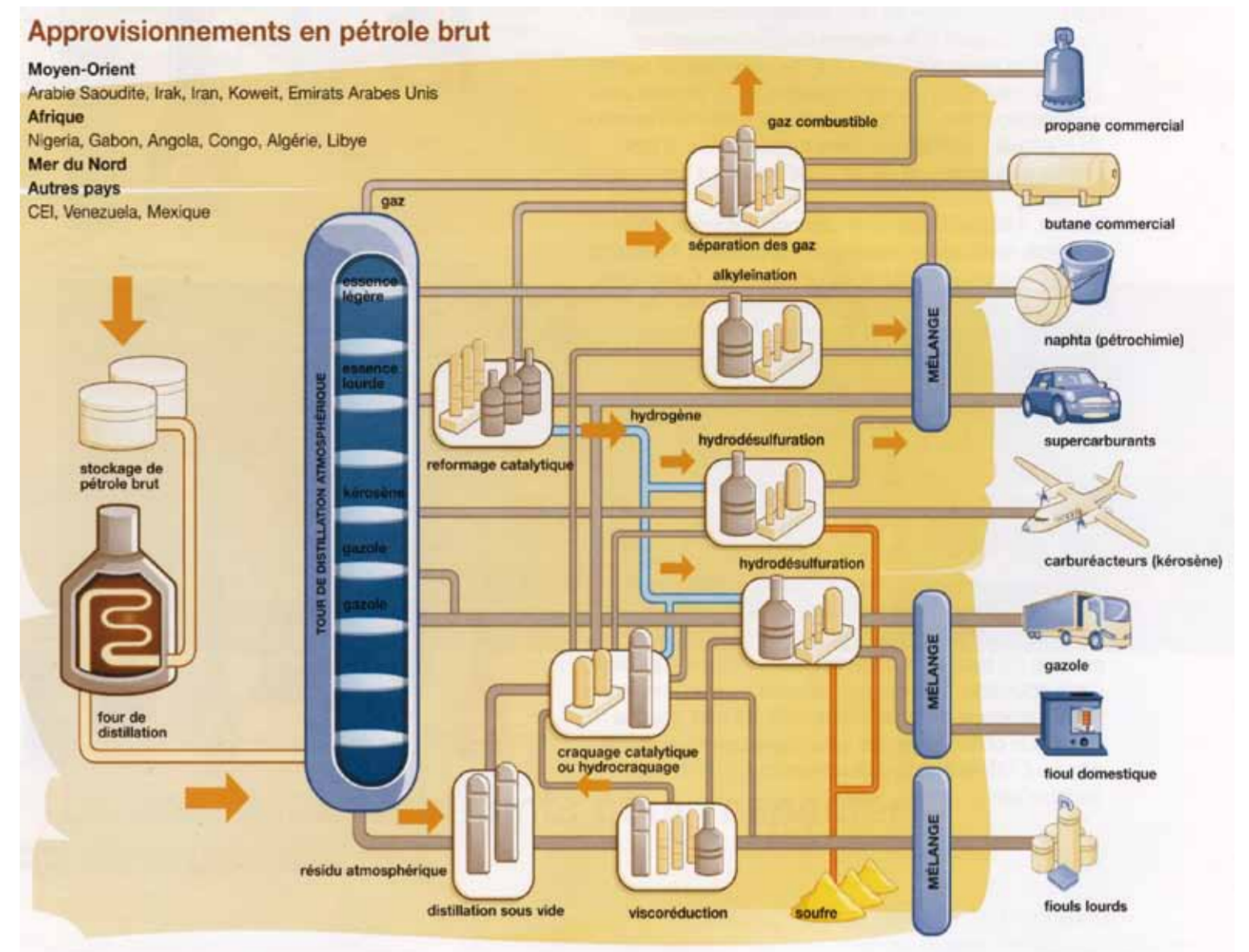
Si l'on effectue le total des réserves prouvées conventionnelles (145 ou 160 Gt), non conventionnelles réalistes (80 Gt), des ressources hypothétiques découvertes escomptées (100 Gt) et accroissement des possibilités de récupération (100 Gt), le total des réserves serait finalement compris entre 420 et 440 milliards de tonnes de pétrole.

Cependant, pour tempérer quelque peu l'optimisme que pourrait procurer cette addition un peu « osée » de réserves (en ce sens que l'on additionne du certain à de l'incertain... des carottes avec des lapins en quelque sorte !) il faut souligner que, depuis les années 1960, le rythme des découvertes de nouveaux gisements a considérablement diminué (figure 1). En conclusion, compte tenu de la consommation mondiale actuelle, et si on s'en tient sagement aux seules réserves prouvées et possiblement récupérables, ces réserves seront fortement entamées, au milieu de ce siècle comme le montre la prospective de production fournie par l'AIE.

7 Prospective de production en Méga barils/jour (AIE)

5) Perspectives 2011 de consommation selon Exxon Mobil

Il s'agit d'un résumé des perspectives énergétiques publié en 2011 par l'Exxon Mobil Corporation.



8 Raffinage du pétrole brut et obtention des produits finis

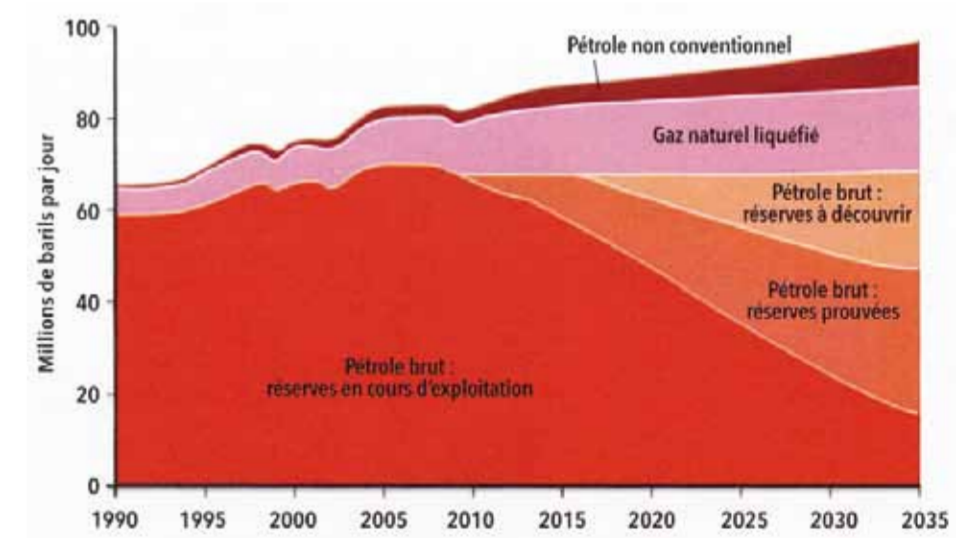
Ces perspectives sont données à titre indicatif. Qu'on s'en félicite ou qu'on les déplore, elles correspondent à ce que l'on observe de manière constante depuis des décennies quant à l'évolution sur le long terme de la consommation d'hydrocarbures liquides, sans qu'il soit constaté de réelles inflexions à l'échelle mondiale.

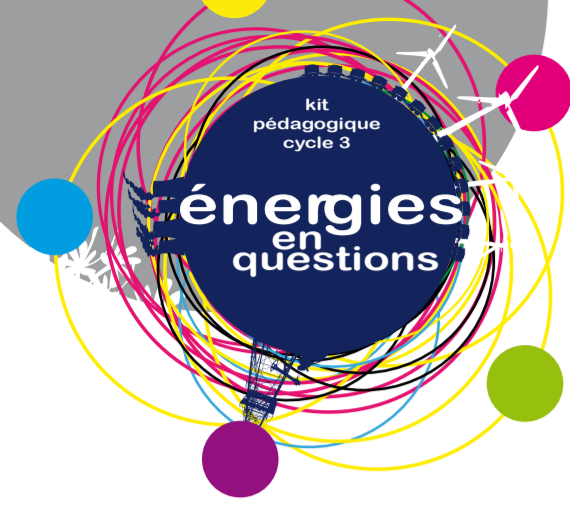
En résumé :
 - la demande mondiale en hydrocarbures (pétrole et gaz) devrait augmenter de 30 % entre 2010 et 2040.
 - tandis que la demande des pays économiquement développés (les pays membres de l'OCDE) devrait rester à peu près stable d'ici 2040, sur la même période, l'accroissement de la demande des pays hors OCDE, Chine, Inde, Indonésie, Brésil... devrait être de 60% environ.
 - l'accroissement global de la demande mondiale entre 2010 et 2040 (au total 30%, soit une croissance de 1% par an) sera « relativement faible » par rapport aux périodes précédentes...

Cette « faiblesse », toute relative, s'explique essentiellement par les efforts accomplis (quoiqu'on en dise !) en matière d'efficacité énergétique. Sans ces efforts l'accroissement de la demande aurait été environ quatre fois plus forte, soit 4% / an ! Devra-t-on se réjouir de cette maigre consolation ?

- sur la même période 2010-2040, le secteur des transports accroîtra sa demande en pétrole et en autres carburants liquides (agocarburants) de 30%. Le secteur du transport de marchandises (terrestre, ferroviaire, maritime et aérien) dopé par la croissance économique des pays émergents (non-membres de l'OCDE) connaîtra un très fort accroissement estimé à + 70% de sa demande énergétique actuelle.

- Dans le même temps, la demande en carburant du secteur automobile devrait rester stable malgré le doublement du parc de voitures. Cette stabilité de la demande du secteur automobile est à mettre à l'actif des progrès réalisés en matière de consommation et de la généralisation des véhicules hybrides qui devraient représenter 50% du parc automobile en 2040.





Lors de sa combustion, le pouvoir calorifique du gaz varie selon que l'on considère :
 - son « **pouvoir calorifique supérieur** » (PCS), celui obtenu par une combustion suivie de la récupération des calories résultant de la condensation de la vapeur d'eau produite pendant cette combustion. L'eau, H₂O, provient de la combustion de l'élément hydrogène l'un des constituants majeurs des molécules du gaz naturel. Ces calories correspondent à la **chaleur latente de vaporisation** de l'eau passant (à température constante) de l'état liquide à l'état de vapeur, chaleur que l'on récupère lorsque l'eau, en sens inverse, passe de l'état de vapeur à l'état liquide.
 - ou son « **pouvoir calorifique inférieur** » (PCI), celui résultant d'une combustion à l'issue de laquelle on ne récupère pas la chaleur latente de vaporisation de l'eau.
 Ainsi, un gaz dont le PCS est de 40 MJ/m³ aura un PCI de 36 MJ/m³ soit une diminution de 10% de l'énergie potentiellement récupérable de ce gaz, d'où l'intérêt des chaudières à condensation qui récupèrent la chaleur latente de vaporisation de l'eau.



Le pouvoir calorifique

Le gaz naturel

1) La production du gaz naturel

Tout comme le pétrole, auquel il est souvent associé, le gaz naturel est extrait des gisements par forage.
 Par le passé (peu regardant sur le gaspillage !), lorsque le pétrole et le gaz étaient associés au sein du même gisement, le gaz était tout simplement brûlé sur place, sans que l'on cherche à le valoriser.
 Les temps ont radicalement changé, maintenant le gaz est devenu précieux, il est soit récupéré pour être valorisé soit réinjecté dans le gisement pour augmenter le potentiel de production de pétrole.

Pour le gaz, la production commercialisée est différente de la production brute. La différence entre les deux productions, brute et commercialisée, provient des proportions de gaz réinjectés (11%) ou brûlés (5%) ainsi que des pertes énergétiques inhérentes aux opérations spécifiques à l'industrie gazière : épuration du gaz, transport par gazoducs ou par méthanier qui nécessite une liquéfaction puis une évaporation, compression en vue d'un stockage sous-terrain. Globalement 80 % de la production mondiale brute extraite des gisements est commercialisée et 20% sont dépensés par la chaîne énergétique allant de l'extraction à la commercialisation.
 La répartition entre production à terre ou en mer varie selon les régions. A titre d'exemple, la production terrestre est de 100% pour l'ex-URSS, elle n'est que de 33% pour l'Europe.

La valeur énergétique d'un gaz est la quantité de chaleur que dégage sa combustion complète. Elle s'exprime en méga joule par mètre cube (MJ/m³). Cette valeur varie d'un gisement à l'autre en fonction de la composition du gaz extrait.
 Le gaz naturel est toujours un mélange de plusieurs gaz, le méthane étant toujours le composant majeur.

Lors de son extraction, en plus du méthane, le gaz naturel contient généralement des hydrocarbures gazeux plus lourds (éthane, butane, propane) ainsi que du gaz carbonique et de l'eau. La présence en proportion variable selon les gisements des composants autres que le méthane modifie le pouvoir calorifique du gaz naturel. A titre indicatif les meilleurs gaz (Norvège, Algérie...) ont un pouvoir calorifique d'environ 40 MJ/m³ (soit 9,6 Mcal/m³) et de 33 MJ/m³ pour les gaz les moins énergétiques (Pays-Bas).

+ Pour en savoir plus
Le pouvoir calorifique

2) Les réserves de gaz naturel conventionnel

Deux zones, l'ex-URSS et l'Amérique du Nord, produisent à elles seules plus de la moitié du gaz extrait dans le monde. Le reste de la produc-

tion se répartit à parts à peu près égales entre le Moyen-Orient, l'Europe de l'Ouest et la zone Pacifique.

Il existe différents types de gisements de gaz naturel :
 - les gisements « mixtes » où le gaz est associé au pétrole, le gaz occupant la partie supérieure du gisement,
 - les gisements « humides » où le gaz contient une quantité appréciable de butane et d'hydrocarbures liquides,
 - les gisements « secs » ne contenant que du gaz.

1 Réserves conventionnelles de gaz en % de la production mondiale (Évaluation 2006)

Les réserves conventionnelles prouvées de gaz sont de 180 000 milliards de m³. Exprimées en tonnes équivalent pétrole (tep), elles sont de 158 milliards de tep. Le pouvoir calorifique supérieur moyen de ces réserves est de 39,6 MJ/m³.
 Lorsqu'on exprime les réserves prouvées de gaz naturel en tonnes équivalent pétrole (158 milliards de tep), on s'aperçoit que l'énergie potentiellement contenue dans les réserves de gaz conventionnel est équivalente à l'énergie potentiellement contenue dans les réserves prouvées de pétrole. Constat surprenant pour un monde qui n'a que récemment pris conscience de cet étonnant potentiel gazier.

Les réserves de gaz conventionnel (figure 1, 2 et 3) sont légèrement mieux réparties dans le monde que les réserves de pétrole. Elles se répartissent entre deux régions, l'ex-URSS (CEI, Sibérie) qui dispose de 32%, des réserves et le Moyen Orient (Qatar, Iran...) qui en dispose de près de 40%. L'OCDE possède 8% des réserves et les autres pays se partagent le solde, soit 20%.

Région	Gm ³	Gtep	%
Amérique du Nord	7 320	6,5	4,1
Amérique du Sud	7 100	6,3	4
Europe et Eurasie	64 020	56,4	35,6
Afrique	14 060	12,3	7,8
Moyen-Orient	72 830	64,1	40,6
Asie et Pacifique	14 210	12,5	7,9
TOTAL Monde	179 540	158,1	100

2 Réserves prouvées de gaz naturel conventionnel en milliards de m³ (Gm³) et en Gtep

3 Réserves prouvées en milliers de milliards de m³

3) La consommation de gaz naturel

Depuis les chocs pétroliers des années 1970, l'augmentation de la consommation du gaz est beaucoup plus rapide que celle du pétrole. On assiste actuellement à un véritable engouement pour le gaz naturel, ce qui s'explique par sa commodité d'emploi, son prix compétitif par rapport à celui du pétrole et à la volonté des États

de diversifier la nature de leurs approvisionnements en hydrocarbures.

Depuis quelques années, c'est un fait totalement nouveau, la consommation de gaz est en très forte augmentation dans le secteur de la production électrique. Les raisons en sont le faible coût des investissements, la rapidité de la construction des centrales (d'où un retour rapide sur les investissements) mais aussi le fait, qu'à production d'électricité égale, la combustion du gaz naturel émet moins de gaz à effet de serre que celle du charbon. A énergie produite équivalente, une tep de gaz émet 2,3 tonnes de CO₂ tandis qu'une tep de charbon en émet 4,1 tonnes, soit presque le double.

A la liste de ces avantages s'ajoute la souplesse de fonctionnement des centrales électriques brûlant du gaz. Leur capacité à changer rapidement de régime de fonctionnement en fait un outil idéal capable de compenser le caractère aléatoire et intermittent de la production des énergies renouvelables, éolienne en particulier, et de répondre aux besoins des réseaux électriques lors des pics de consommation, aux heures de pointe.

Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie, entre 2010 et 2040, la croissance de la demande mondiale de gaz naturel devrait être de 60%, elle sera particulièrement forte de la part des pays non-membres de l'OCDE, elle devrait tripler dans la zone Asie-Pacifique.

Comme indiqué précédemment, l'accroissement de la demande le plus important viendra du secteur de la production d'électricité qui consommera à lui seul entre 40 et 50% des ressources énergétiques mondiales en 2040.

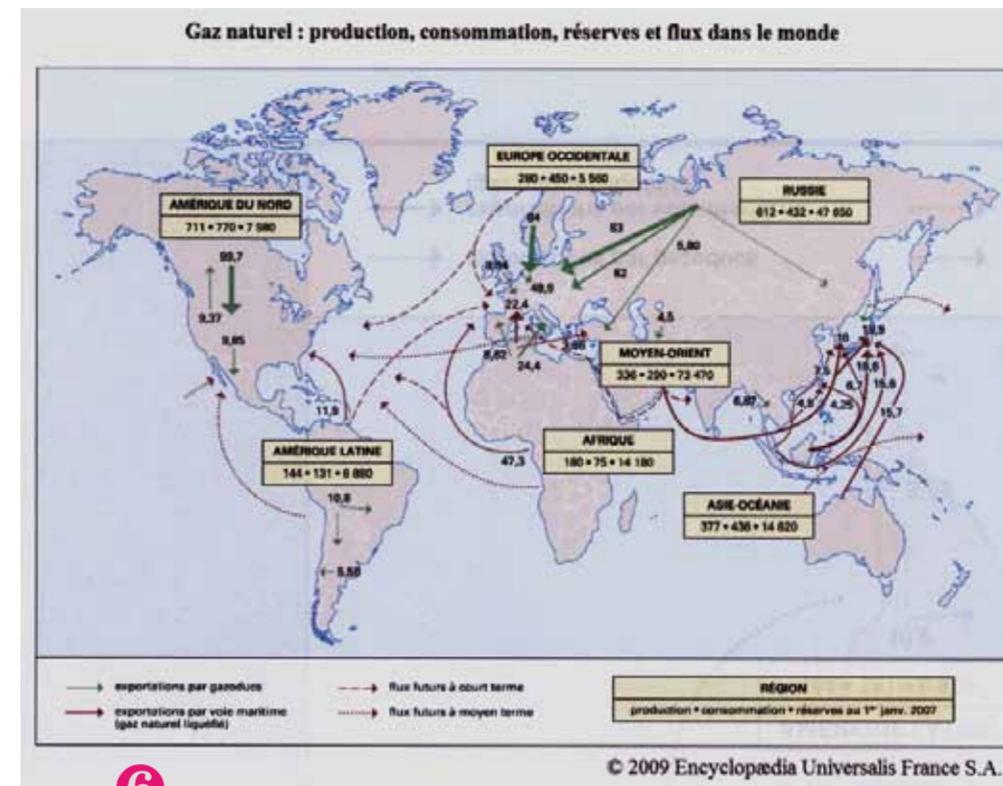
4 Accroissement de la consommation de gaz entre 2010 et 2030

A cette échéance, le gaz naturel se sera en grande partie substitué au charbon, le principal combustible utilisé dans les centrales thermiques jugé trop polluant.

Outre les réserves conventionnelles connues, qui ne sauraient répondre aux besoins au-delà de 60 ou 70 ans au rythme de consommation annuelle actuelle, en 2040 l'extraction du gaz non conventionnel (chapitre 4) devrait représenter plus de 30% de la production mondiale.

Producteurs		Exportateurs		Importateurs		
Gm ³	%	Gm ³		Gm ³		
Russie	656	22,0	Russie	203	USA	119
USA	524	17,6	Canada	102	Allemagne	94
Canada	189	6,4	Norvège	86	Japon	89
Iran	98	3,3	Algérie	64	Italie	77
Norvège	91	3,1	Pays B	54	Ukraine	50
Algérie	89	3,0	Turkmén	50	France	45
Royaume U	83	2,8	Indonésie	35	Espagne	34
Pays B	77	2,6	Malaisie	31	Corée S	33
Indonésie	72	2,4	Qatar	31	Turquie	30
Turkmén.	67	2,3	USA	20	Pays B	25
Monde	2976	100				

5 Les principaux producteurs, exportateurs et importateurs de gaz naturel (en milliards de m³)



6 Les gaz « non conventionnels »

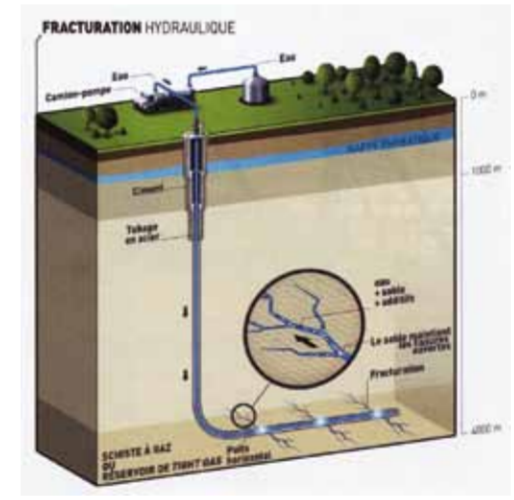
Tout comme pour le pétrole, en plus des réserves prouvées de gaz, on distingue des réserves de gaz non conventionnel et des réserves hypothétiques (escomptées) restant à explorer. L'évaluation de l'importance des réserves de gaz non conventionnel, est complexe et donc controversée. Bien que leur évaluation soit récente et toujours en cours, ces réserves permettraient de doubler le total des réserves conventionnelles actuellement répertoriées, portant le total des ressources gazières à 300 milliards de tonnes équivalent pétrole.

Les gaz non conventionnels ont pour nom « **gaz de schiste** », « **tight gas** » et « **grisou** ».

Comme les gaz conventionnels, les gaz non conventionnels sont essentiellement composés de méthane. Ce qui les distingue est la configuration géologique du gisement (figure 8). Cette configuration détermine les conditions particulières de leur exploitation, d'où l'appellation de non conventionnel de ces gaz.

Les gaz non conventionnels sont des gaz qui n'ont pas pu migrer hors de la roche mère pour rejoindre une roche réservoir ou migrer jusqu'en surface. Ces gaz sont restés prisonniers dans la roche mère dans laquelle ils se sont formés, emprisonnés dans des argiles ou des marnes qui avec le temps sont devenues très compactes. Contrairement aux réservoirs d'hydrocarbures conventionnels formés de roches poreuses que l'on exploite par simple forage, la compacité de la roche des réservoirs de gaz non conventionnel nécessite, en préalable à l'exploitation du réservoir, de **fracturer hydrauliquement** la roche à l'aide de forages horizontaux (figure 7). La fracturation s'effectue par injection sous très forte pression d'un mélange d'eau, d'additifs et de sable, les grains du sable étant destinés à maintenir ouvertes les microfissures créées par la fracturation. Ultérieurement, en phase d'exploitation, ces mêmes forages horizontaux collectent le gaz en provenance de la multitude de micro fissures créées lors de la fracturation.

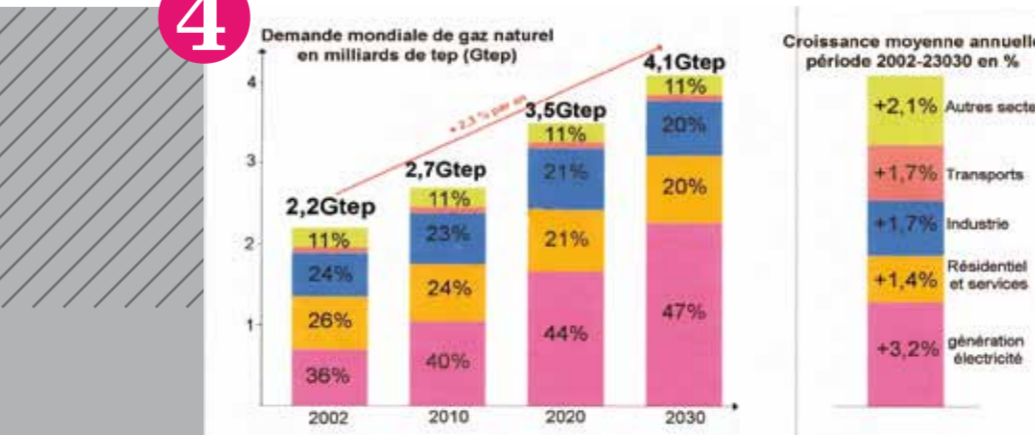
Rappelons que l'appellation de conventionnel ou de non conventionnel des gaz est toute relative, elle évolue en fonction des progrès technologiques, ce qui hier semblait irréalisable devient aujourd'hui courant. Mais l'appellation est surtout fonction de la volonté de chaque état d'exploiter ou non cette ressource s'il en dispose. Elle varie d'un pays à l'autre, tabou ici, elle constituera ailleurs une ressource gazière essentielle, intensivement exploitée !



7 Principe de la collecte du gaz par fracturation hydraulique

La figure 8 présente les différents types de réservoirs de gaz.
 Le gaz naturel conventionnel (Conventional gas) associé ou non à du pétrole est représenté en haut à gauche et à droite. Il a migré vers une roche réservoir poreuse (en jaune) différente de la roche mère (en noir) au sein de laquelle il s'est formé.

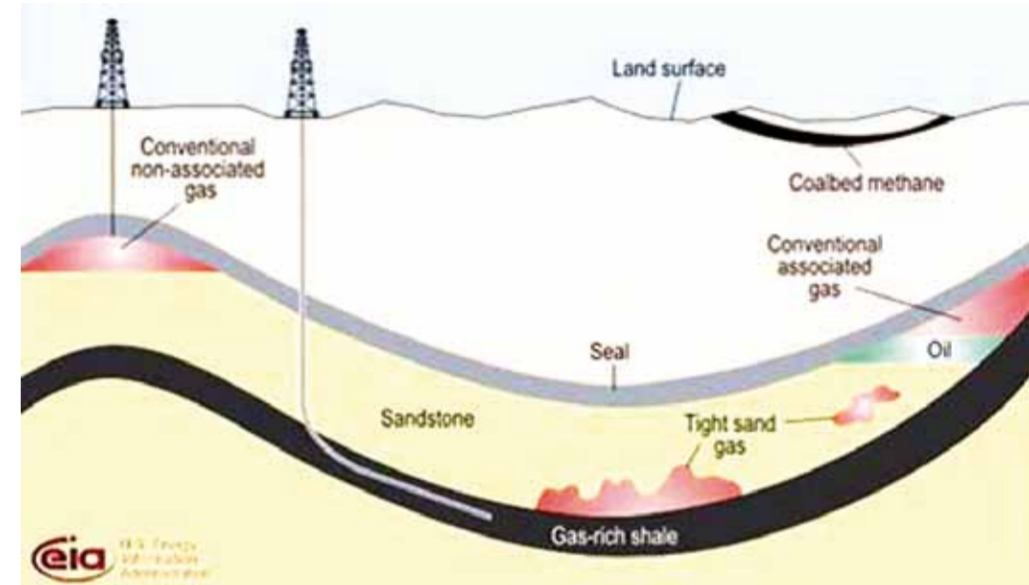
4 Accroissement de la consommation de gaz entre 2010 et 2030



Le total des ressources de gaz non conventionnel est actuellement estimé à plus de 150 000 milliards de mètres cubes.
 L'ensemble des trois gaz non conventionnels représente actuellement 15% de la production mondiale et près de 60% de la production Nord-Américaine.
 Aux USA, cette production est assurée par plus de 30 000 puits horizontaux spécifiquement forés pour la récupération des gaz de schiste non conventionnels.
 En Europe les réserves de gaz de schiste sont importantes. La France détient le tiers de ces réserves, la Pologne en possédant un autre tiers. Les réserves françaises sont estimées à 5 100 milliards de mètres cubes, ce qui représente un siècle de consommation nationale au rythme actuel.



Les réserves de gaz non conventionnels



Noir : la roche-mère (sédiments ou charbon)
 Jaune : roche réservoir (sandstone) poreuse ou devenue compacte (tight sand gas)
 Bleu : roche de couverture imperméable (Seal)
 Rouge : poches de gaz, conventionnelles (associée ou non au pétrole) et non conventionnelles

8 Les différents types de réservoirs de gaz naturel conventionnel et non conventionnel

Un gaz non conventionnel est soit resté prisonnier de la roche mère (en noir) devenue très compacte (gas-rich shale et coalbed-méthane), soit (tight sand gas) resté prisonnier de la roche réservoir (sandstone) trop compacte et inexploitable par les méthodes conventionnelles de forage.

- le **gaz de houille** ou **grisou** (coalbed méthane).

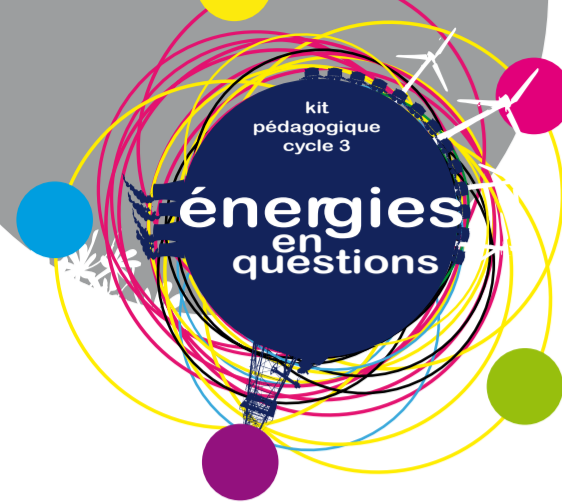
On l'extrait par dépressurisation des veines de charbon. Ce gaz représente déjà 10 % de la production de gaz des USA.
 Par ailleurs, des procédés en cours d'expérimentation permettent la transformation in-situ du charbon sans l'extraire, soit en gaz (gazéification) soit en hydrocarbures liquides (liquéfaction) en vue de la fabrication de carburants synthétiques. Cette production s'accompagne d'une forte production de CO₂, aussi ces procédés ne devraient pouvoir se développer que si l'on est en mesure de capter et de stocker de manière fiable le CO₂ produit.

- le **gaz de schiste** (gas-rich shale) est le gaz qui n'a pas pu s'échapper de la roche mère dans laquelle il s'est formé pour rejoindre une roche réservoir. Pour que ce gaz puisse être recueilli il faut recourir à la fracturation hydraulique de la matrice sédimentaire dans laquelle il est prisonnier. Les réserves de gaz de schiste sont importantes, elles sont estimées à 10 % du total mondial des réserves de gaz.

- le **tight gas**, est également un gaz resté prisonnier, non pas dans la roche mère comme le gaz de schiste, mais dans une roche réservoir devenue compacte par métamorphisme (transformation due à l'enfouissement, à la pression et à l'augmentation de la température). Cette transformation a altéré les caractéristiques physiques et la porosité de la roche et a bloqué la migration du gaz. L'extraction de ce gaz nécessite également une fracturation hydraulique de la roche.

9 Les principales réserves de gaz de schiste dans le monde





5) Les hydrates de méthane

Sous certaines conditions, à basse température et sous une pression élevée, soit dans les sédiments océaniques profonds soit dans les sols gelés tel le permafrost des régions arctiques, les molécules de méthane résultant de l'activité de bactéries méthanogènes (productrices de méthane) se retrouvent piégées dans une sorte de cage de glace. Le méthane forme avec les molécules d'eau de la « cage » un « hydrate de méthane ».



10 Bulles de méthane prisonnières de la « glace »

Le composé d'hydrate de méthane est stable à basse température et haute pression mais, lorsque la température de l'eau océanique ou celle des sols augmente et dépasse une certaine valeur, le méthane peut se libérer de son piège de glace et se retrouver sous forme gazeuse, 1 m³ d'hydrate libère un volume considérable pouvant aller jusqu'à 170 m³ de méthane sous forme gazeuse.

La température au-dessus de laquelle le méthane se libère est fonction de la pression à laquelle se trouve soumis l'hydrate de méthane, de la profondeur du plancher océanique ou du sol gelé où cet hydrate est prisonnier.

La découverte des hydrates de méthane au fond des océans est récente, les dernières estimations évaluent les quantités de gaz contenues dans ces hydrates à... un million de milliards de mètres cube. Certains estiment (ce qui reste encore à démontrer !) que ces quantités sont équivalentes au double des ressources de tous les combustibles fossiles confondus ! Ces ressources d'hydrates sont pour l'essentiel réparties au fond des océans. On connaît moins bien l'importance des ressources terrestres.

Quelle que soit la fiabilité des estimations, il est certain que les ressources sont gigantesques, aussi de nombreuses compagnies pétrolières se sont déjà intéressées à une éventuelle récupération et au traitement de ces énormes quantités potentielles de méthane. L'exploitation des hydrates de méthane se heurte encore à de nombreuses difficultés d'ordre technologique et environnemental qui sont loin d'être résolues. Plusieurs expérimentations et installations pilotes sont en cours. Le Japon, pauvre en ressources primaires mais qui a un besoin vital d'énergie et qui bénéficie à proximité de la présence de fosses marines de grande profondeur, investit naturellement beaucoup dans la recherche sur les hydrates de méthane. Le Canada expérimente la récupération du méthane dans le permafrost de son grand Nord.

10 Bulles de méthane prisonnières de la « glace »

La relation entre le changement climatique et les hydrates de carbone mérite d'être évoquée. Elle pose un problème similaire à celui de la poule et de l'œuf : qui a précédé l'autre ? Problème classique dans lesquels un effet interagit sur sa cause (... et vice versa !) et dans lequel il est impossible de démêler une cause de son effet.

- Commençons par le problème posé par un changement climatique important. Si ce changement était en mesure d'entraîner la fusion du permafrost ou un réchauffement conséquent du fond des océans par les courants profonds (voir chapitre « machine climatique »), ce réchauffement pourrait entraîner la libération d'une quantité considérable de méthane à partir des hydrates de méthane.

Le méthane étant un gaz à effet de serre dont le pouvoir radiatif (« l'efficacité » vis à vis de l'effet de serre) est vingt fois supérieur à celui du CO₂, la libération de ce méthane engendré par le changement climatique aurait un effet amplificateur sur le changement lui-même.

Dans un tel scénario, on pourrait alors assister, à l'échelle mondiale, à un phénomène qui s'auto-accélererait sans qu'a priori il soit possible d'intervenir ni d'en contrôler l'évolution.

Sans faire de catastrophisme, certains scientifiques cherchent à savoir si un tel phénomène ne se serait pas déjà produit il y a environ 250 millions d'années à la fin de l'ère primaire (à la limite Permien-Trias) ce qui



Les hydrates de méthane et le changement climatique... ou le problème de l'œuf et de la poule.

pourrait expliquer la gigantesque extinction de la vie marine qui, à cette époque, a touché plus de 85% des espèces.

La menace d'une libération de méthane à partir des hydrates de méthane est prise en considération par les climatologues dans les scénarios les plus pessimistes décrivant les siècles prochains.

- Le second problème concerne une éventuelle exploitation massive des hydrates de carbone. Cette exploitation à partir de dépôts sous-marins ou terrestres (à « océans ouverts » ou « à ciel ouvert ») serait inévitablement source d'importantes émissions de méthane dans les océans et dans l'atmosphère. Connaissant le pouvoir radiatif du méthane, malgré toutes les précautions prises, ces émissions participeraient à une augmentation sans nul doute significative de la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère, et cela d'autant plus qu'à ces émissions de méthane, viendraient s'ajouter les émissions de CO₂ d'origine fossile résultant de la combustion du méthane lui-même.

Finalement l'exploitation à grande échelle des hydrates de méthane sera-t-elle une opportunité ou au contraire une menace pour la planète et ses habitants ? Il est difficile aujourd'hui de trancher mais, si dans le futur la menace d'un emballement difficilement maîtrisable devait s'avérer réelle, quelle qu'ait été la cause première, changement climatique ou exploitation massive des hydrates de carbone, l'activité humaine aura eu une grande part de responsabilité dans le processus.

Le charbon

1) Mines et gisements

L'extraction du charbon s'effectue en mines le plus souvent souterraines, parfois situées à grande profondeur.

Si la profondeur d'enfouissement du charbon n'excède pas 200 à 300 m, l'exploitation peut se faire à ciel ouvert. Dans ce cas elle nécessite au préalable d'enlever les couches de terrain recouvrant les veines de charbon ou de lignite.

Contrairement au pétrole, ou au gaz, pour lesquels il « suffit » de forer pour exploiter un gisement, pour extraire le charbon il faut pouvoir accéder physiquement aux veines (ou filons) avec un matériel lourd et important et du personnel. Du fait de la température qui croît avec la profondeur, l'exploitation d'une mine par les hommes ne s'avère guère possible au-delà d'une certaine profondeur, 1 500 m constituant généralement une limite.

Pour que les couches (ou veines) de charbon soient techniquement et économiquement exploitables il faut qu'elles aient une épaisseur minimale, une certaine continuité, qu'elles ne soient pas trop disloquées et soient à une profondeur qui les rende accessibles.

Les contraintes techniques et économiques liées à l'exploitation des mines ainsi que la diversité de la valeur énergétique des charbons ont conduit, en 1998, à dresser un inventaire des ressources mondiales et des réserves prouvées de charbon, c'est-à-dire un inventaire des mines et des gisements raisonnablement exploitables compte tenu de l'intérêt énergétique des charbons extraits de ces mines et gisements.

1-1 LES RESSOURCES

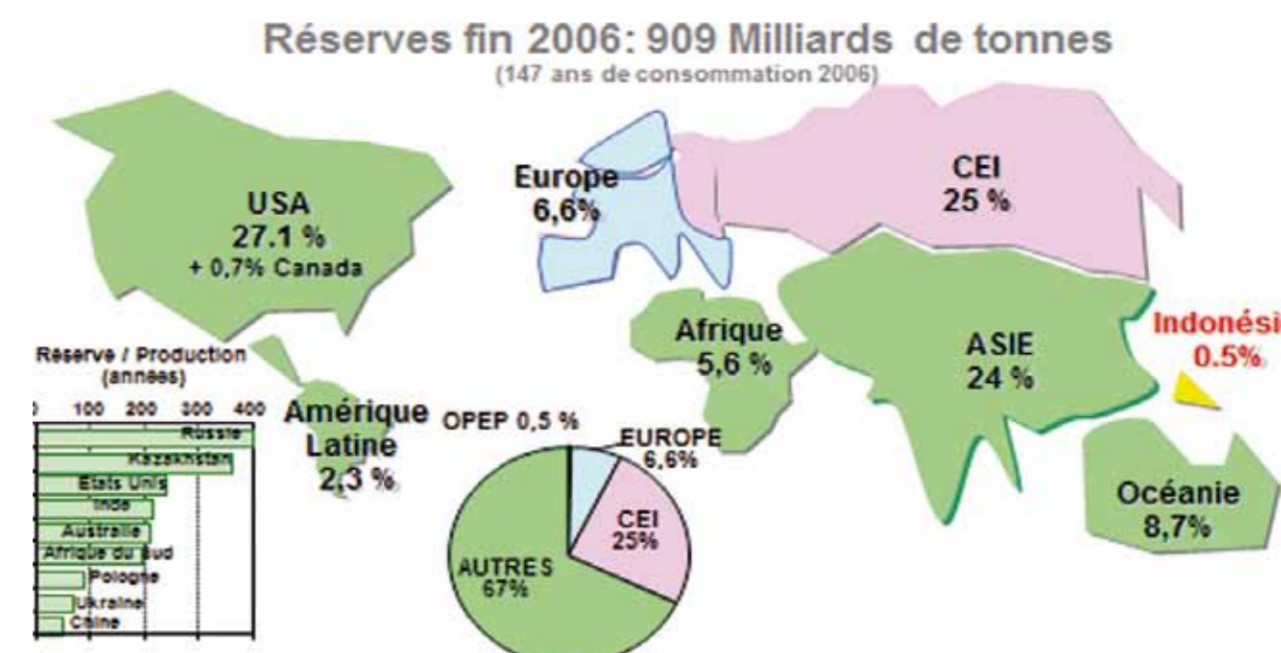
Pour les charbons et le lignite, la ressource serait de **5 500 milliards de tonnes équivalent charbon**. La définition de la « tonne équivalent charbon » tenant compte de la valeur énergétique des différentes sortes de charbons est donnée sur la figure 2.

Les trois quarts des ressources se trouvent sur le territoire des consommateurs les plus importants : 11 % en Amérique du Nord (les Etats Unis étant les plus gros consommateurs) 37% dans l'ex-URSS (Russie, Kazakhstan, Sibérie et Ukraine), 45% dans la zone Asie-Pacifique (Chine, Inde, Australie) et seulement 3% en Europe (Pologne, Allemagne). On trouve également du charbon en Afrique du Sud et en Amérique Latine (Venezuela, Colombie)... mais pas au Moyen Orient.

1-2 LES RÉSERVES

Les **réserves prouvées**, soit la partie des ressources que l'on considère actuellement comme techniquement et économiquement exploitable, sont d'un peu plus de **900 milliards de tonnes équivalent charbon** pour le charbon et de **1 160 milliards de tec** pour le lignite.

1 Répartition mondiale des réserves prouvées de charbon



1 Répartition mondiale des réserves prouvées de charbon

En Europe, la Pologne est le principal producteur de charbon, elle dispose d'importantes réserves. L'Allemagne quant à elle dispose de réserves de lignite exploitées à ciel ouvert évaluées à plus de 350 ans de sa consommation actuelle.

Les charbons extraits des mines doivent être triés de manière à séparer le charbon des roches auxquelles il est intimement mélangé. Malgré ce tri, le charbon contient encore des minéraux intimement liés qui ne peuvent être séparés. Après combustion ces minéraux formeront des cendres ou, lorsque celles-ci s'agglomèrent et se compactent, des mâchefers. Les charbons contiennent également une quantité plus ou moins importante de matières volatiles, méthane (grisou), hydrogène, hydrocarbures complexes, eau, gaz carbonique...

Ces divers composants solides ou volatils présents en proportions variables, déterminent le pouvoir calorifique des différents charbons, couramment exprimé en kilocalories par kilo (kcal/kg).

1-3 LES DIFFÉRENTES QUALITÉS DE CHARBON.

Il existe une très grande variété de charbons offrant des qualités énergétiques très différentes (figure 2 et 3), allant de médiocre à excellente. Pour quantifier les quantités de charbon (leur tonnage) tout en tenant compte de leur intérêt énergétique (leur pouvoir calorifique), il a été nécessaire de créer une unité spécifique associant tonnage et pouvoir calorifique : « la tonne équivalent charbon », la « tec ».

Par convention, on attribue à la « tec » un pouvoir calorifique de 7 000 kcal par kilogramme de charbon. Ainsi, lorsqu'on exprime une quantité de charbon en tec, on exprime explicitement cette quantité en énergie potentiellement contenue dans le charbon et non en masse. Du point de vue énergétique le pouvoir calorifique de la « tec » est équivalent à celui de 0,7 tonne équivalent pétrole (tep).

2 Classification des charbons selon leur qualité et leur pouvoir calorifique

Il est assez difficile de s'y retrouver dans les équivalences énergétiques entre le pétrole et le charbon, ainsi qu'entre les différentes provenances et qualités de charbon.

Il en est de même pour les données statistiques concernant les tonnages de charbon extraits des mines (où, avant tri, on totalise le tonnage du charbon et celui des minéraux stériles associés) et les tonnages, après tri, de charbon commercialisable.

Les statistiques étant souvent données en tonnes de charbon brut extrait il convient de convertir les tonnes de charbon brut extrait (avant tri) en tonnes équivalent charbon, la « tec ».

Pour résumer le plus simplement possible retenons que : - une tonne équivalent charbon, une tec est, par convention, équivalente à 0,7 tep, et son pouvoir calorifique est égal à 7 000 kcal/kg.

- la qualité d'un charbon est fonction de sa teneur en carbone, l'élément qui détermine son pouvoir calorifique, - plus les teneurs en cendres, en matières volatiles et en humidité d'un charbon sont importantes, plus faible sera sa teneur en carbone et, en conséquence, moins élevé sera son pouvoir calorifique, - la figure 2 fournit une classification des charbons, depuis une qualité médiocre pour la tourbe (pouvoir calorifique 1000 kcal/kg) à une qualité excellente pour l'antracite (pouvoir calorifique moyen de 8 000 kcal/kg). On en déduit qu'une tonne de tourbe équivaut à 0,14 tec et qu'une tonne d'antracite équivaut à 1,14 tec.

- pour un pays producteur, en se basant sur le pouvoir calorifique moyen de sa production charbonnière, on obtient des équivalences globales : la tonne de charbon américain équivaut à 0,65 tep, une tonne de charbon allemand à 0,6 tep et une tonne de charbon chinois à 0,5 tep.

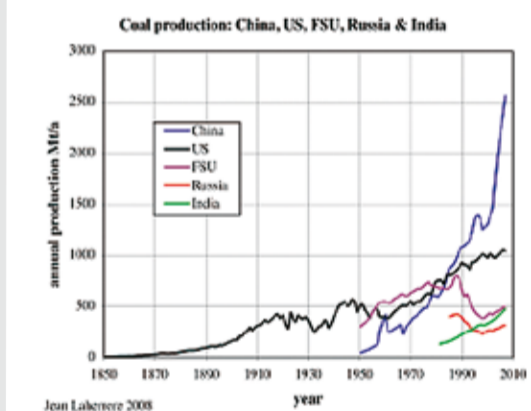


Équivalence énergétique entre les divers charbons

2) La production mondiale de charbon

La production mondiale de charbon a crû régulièrement depuis le début du XX^{ème} siècle pour atteindre un maximum en 1989 à 4,8 milliards de tonnes. La production s'était provisoirement stabilisée suite à une décroissance de la production européenne (coût d'extraction excessif et développement du nucléaire) et de la production des pays de l'ex-URRS (restructuration du secteur charbonnier).

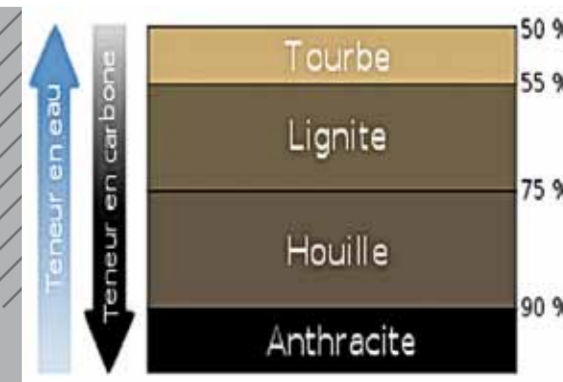
Depuis le début du XXI^{ème} siècle, la production a repris à un rythme très soutenu principalement en Asie, en Inde et surtout en Chine où la production a littéralement explosé (figure 3). La production Nord-Américaine progresse de manière régulière.

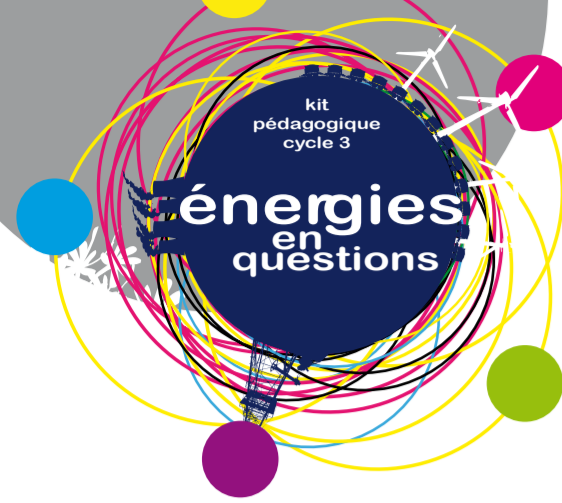


3 Evolution de la production annuelle de charbon (en millions de tonnes)

2 Classification des charbons selon leur qualité et leur pouvoir calorifique

CEE USA Canada	Peat Tourbe	Lignite Browncoal Lignite	Sub-bitumineux Flambant sec	Bitumineux haut volatiles Hard coal Flambant gras	Bitumineux bas volatiles Gras	Anthracite
Rang	low	low	medium	medium	high	high
Pouvoir calorifique (kcal/kg)	1000-1500	3500-4500	4500-6500	6500-7800	6500-7800	7800-8500
Humidité (%)	> 50 %	25-50 %	14-25 %	5-10 %	5-10 %	1-6 %
Matières volatiles (%)	> 75 %	50 %	25-50 %	30-40 %	15-25 %	< 10 %
Teneur en cendres	50 %	30-50 %	20-30 %	10-20 %	10-20 %	0-10 %





Pays	Production		Export
	Anthracite	Lignite	
Chine	2481		
USA	990	76	45
Inde	427	30	
Australie	309	71	231
Afrique du S	244		69
Russie	233	76	92
Indonésie	169		129
Pologne	95	61	
Kazakhstan	92	5	
Colombie	54		60
MONDE	5 370	914	815

4) Production annuelle des principaux pays producteurs en millions de tonnes

Concernant l'Europe (figure 5), on retiendra l'importance des importations de charbon ainsi que l'importance de la production de lignite, plus de 470 millions de tonnes, notamment en Allemagne qui en est le principal producteur avec 169 millions de tonnes.

3) Evolution de la consommation du charbon

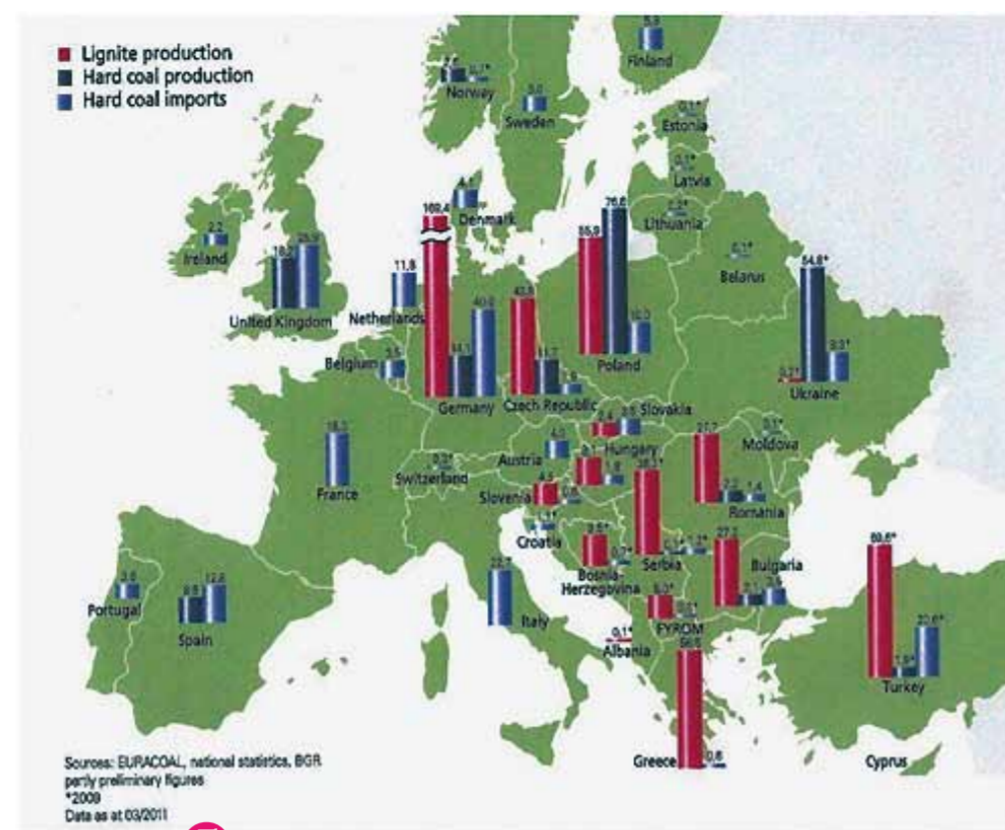
Pendant un siècle, entre 1850, début de l'ère industrielle, et 1950, le charbon a été la principale source d'énergie. A partir de la seconde moitié du XXème siècle, le charbon a été détrôné par le pétrole.

En ce début du XXIème siècle, on assiste à un revirement. La consommation mondiale de charbon progresse de nouveau et régulièrement à un rythme soutenu, 3% par an, supérieur même à celui du gaz (+ 2,3 %), elle est passée ces trente dernières années de 3 à 5 milliards de tonnes. Le charbon représente aujourd'hui presque le quart de l'énergie primaire mondiale.

Compte tenu de l'importance des réserves prouvées de charbon, et du déclin prévisible de la production d'hydrocarbures liquides conventionnels à coût raisonnable, l'intérêt porté au charbon ira croissant, en particulier dans les grands pays émergents de la zone Asie - Pacifique.

L'origine de cette nouvelle et rapide croissance tient au fait que le charbon occupe la première place dans la production mondiale d'électricité (40%), loin devant le gaz (19%), l'hydraulique et le nucléaire (16% chacun), le pétrole (fioul lourd) ne représentant plus que 7%.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie, pour satisfaire les nouveaux besoins en électricité des pays émergents et des pays les plus démunis (rappelons qu'à travers le monde, près de 2 milliards d'habitants sont encore privés d'électricité) plus d'un millier de nouvelles centrales thermiques à charbon ou à lignite devront être construites d'ici 2035. Chaque semaine la Chine met en service une nouvelle centrale à charbon d'une puissance moyenne de 450 MW électriques. Les Etats Unis et l'Europe ne sont pas en reste, de nombreuses centrales à charbon (ou à lignite en Allemagne) sont en cours de construction, d'autres sont en projet.



5) Production européenne de charbon et de lignite et importation de charbon (en Mt)

Pour produire un milliard de kWh (soit 0,2% de la production annuelle française), il faut brûler 300 000 tonnes de charbon de bonne qualité soit l'équivalent de 150 trains de 80 wagons chacun chargé de 25 t de charbon. La combustion de ces 300 000 t génère 1 million de tonnes de gaz carbonique. Afin d'obtenir la même quantité d'électricité, ce chiffre de 300 000 tonnes de charbon doit être multiplié par 1,3 pour les charbons de qualité médiocre brûlés préférentiellement dans les centrales électriques et par 2 pour le lignite.

4) Les usages du charbon et du lignite

Les principaux usages du charbon sont :

Production d'électricité	50%
Sidérurgie	15%
Chauffage urbain	15%
Cimenteries	5%
Chauffage domestique	5%
Autres usages	11%

Notons que le lignite est presque exclusivement réservé à la production d'électricité

Dans le futur, les usages du charbon ne se limiteront pas à ces seuls usages. Le charbon sera en particulier utilisé en substitution aux hydrocarbures pour la fourniture de matières premières pour la chimie et pour la fabrication de carburants synthétiques liquides.

Les procédés de fabrication des carburants synthétiques liquides à partir du charbon en sont au stade de la recherche et les premières installations, à celui des unités pilotes.

Certains procédés envisagent d'exploiter in situ des gisements de charbon dont les veines sont aujourd'hui considérées comme inexploitable car trop profondément enfouies, de trop faible épaisseur ou trop fragmentées.

A l'aide de forages horizontaux, l'un des procédés consiste à gazéifier le charbon in-situ par injection d'oxygène et de vapeur d'eau à haute température. Par des procédés chimiques, les gaz récupérés servent à l'obtention de carburants liquides de synthèse.

Les procédés testés restent coûteux, gros consommateurs d'énergie (donc de rendement faible) et leur impact environnemental est encore assez mal évalué. Ils produisent en particulier une assez grande quantité de gaz carbonique et ne seraient acceptables que dans la mesure où ce CO2 serait capté et stocké dans des formations géologiques, ce qui réduirait de nouveau le rendement des procédés.

5) Le lignite

Le lignite est un charbon en cours de formation. Il est présent sur Terre en quantités énormes.

Il est extrait des sédiments continentaux (sables ou argiles du Tertiaire et du Quaternaire) à partir de gisements situés à faible profondeur, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres tout au plus. Ces gisements sont exploités à ciel ouvert. Dans les meilleures mines, l'épaisseur des veines de lignite peut dépasser plusieurs dizaines de mètres.

Pour atteindre les couches de lignite il est nécessaire de déblayer les couches de terrain recouvrant les veines de lignite à l'aide d'immenses excavatrices.

En Allemagne, dans une mine de lignite à ciel ouvert, une excavatrice (figure 6) d'un poids total de 28 000 tonnes est capable de déplacer 500 000 tonnes de déblais et d'extraire 160 000 tonnes de lignite par jour.

6) Excavatrice déblayant le mort-terrain situé au-dessus du lignite

Par rapport au charbon, le lignite est un combustible médiocre : une tonne brute de lignite équivaut en moyenne à 0,4 tec. Pour produire la même énergie il faut extraire deux fois plus de lignite que de charbon, aussi, afin de réduire les coûts de transport, le lignite est-il généralement brûlé dans des centrales situées à proximité immédiate de la mine.

Lors de son extraction, le lignite comporte de 40 à 70% d'humidité et beaucoup de matières organiques, de soufre et assez souvent des métaux lourds (mercure...). Le lignite doit être séché avant son introduction dans le foyer des chaudières et le mode de combustion retenu doit impérativement limiter les rejets de gaz sulfureux et d'oxyde d'azote.

La combustion du lignite dans une chaudière classique serait de ce fait très polluante, seules les **chaudières à lit fluidisé** ou à **gazéification préalable** sont en mesure de respecter les normes environnementales actuelles.

Ce sont des installations complexes nécessitant de lourds investissements que tous les producteurs d'électricité ne peuvent hélas pas se permettre.

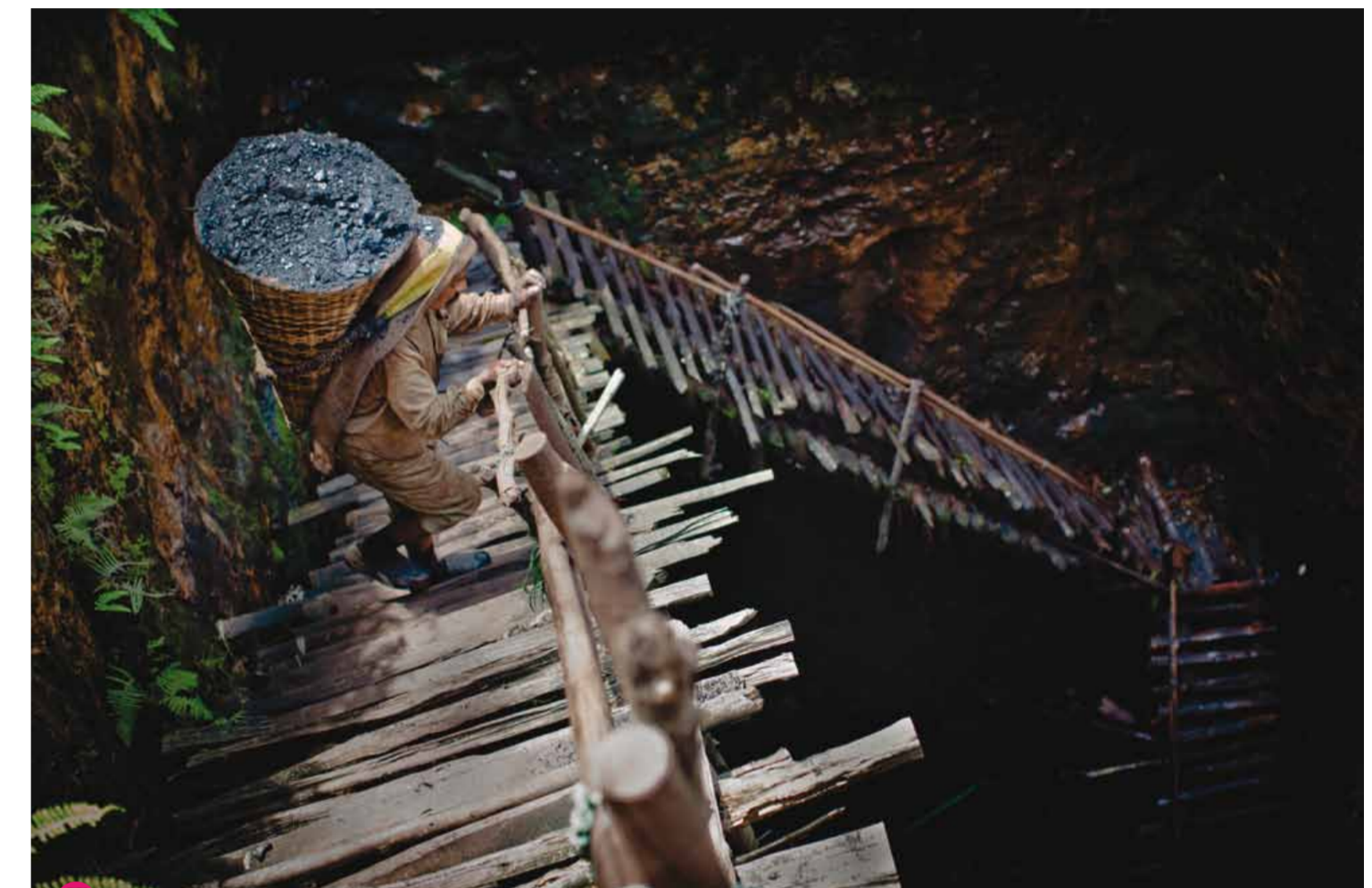
L'AIE prévoit une hausse de la consommation du lignite d'environ 1% par an pour atteindre 1,2 Gt à l'horizon 2020.

Les principales réserves sont localisées en Australie (26%) aux USA (20%) en Chine (12%) en Sibirie (9%), en Russie (7%), en Allemagne (4%), en Pologne...

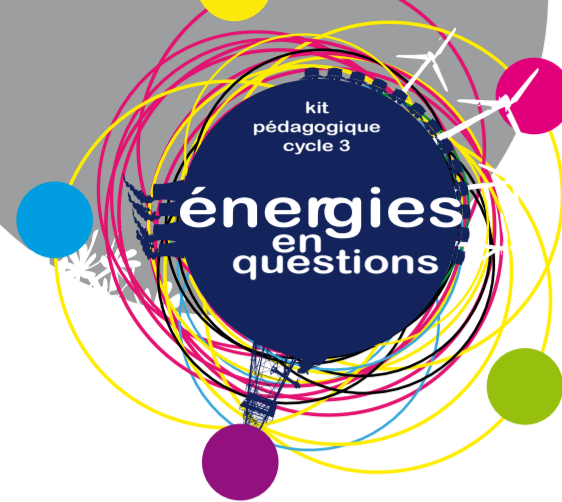
L'Allemagne est le premier producteur de lignite au monde avec une production annuelle de 168 millions de tonnes intégralement utilisée à la génération d'électricité, le lignite assure le quart de la production allemande avec une participation en constante progression.



6) Excavatrice déblayant le mort-terrain situé au-dessus du lignite



7) Extraction du charbon à dos d'homme (mine de Jaintia Hills en Inde)



La réaction de fission

1) La réaction de fission et de fission en chaîne

1-1 LA DÉCOUVERTE DE LA FISSION

Le principe de la réaction de fission (voir ci-après) a été découvert en 1938 en Allemagne par Otto Hahn et Fritz Strassmann. En 1939, en France, Frédéric Joliot, Hans Alban et Lev Kowarski montrent qu'à partir d'une fission et des neutrons émis au cours de cette fission, il est possible d'initier d'autres fissions et donc d'entretenir la réaction. C'est le principe de la réaction de fission en chaîne. Chaque réaction de fission produisant une énergie beaucoup plus importante qu'une réaction chimique (une combustion par exemple), l'idée a immédiatement été émise d'utiliser cette réaction en chaîne aux fins de production d'énergie.

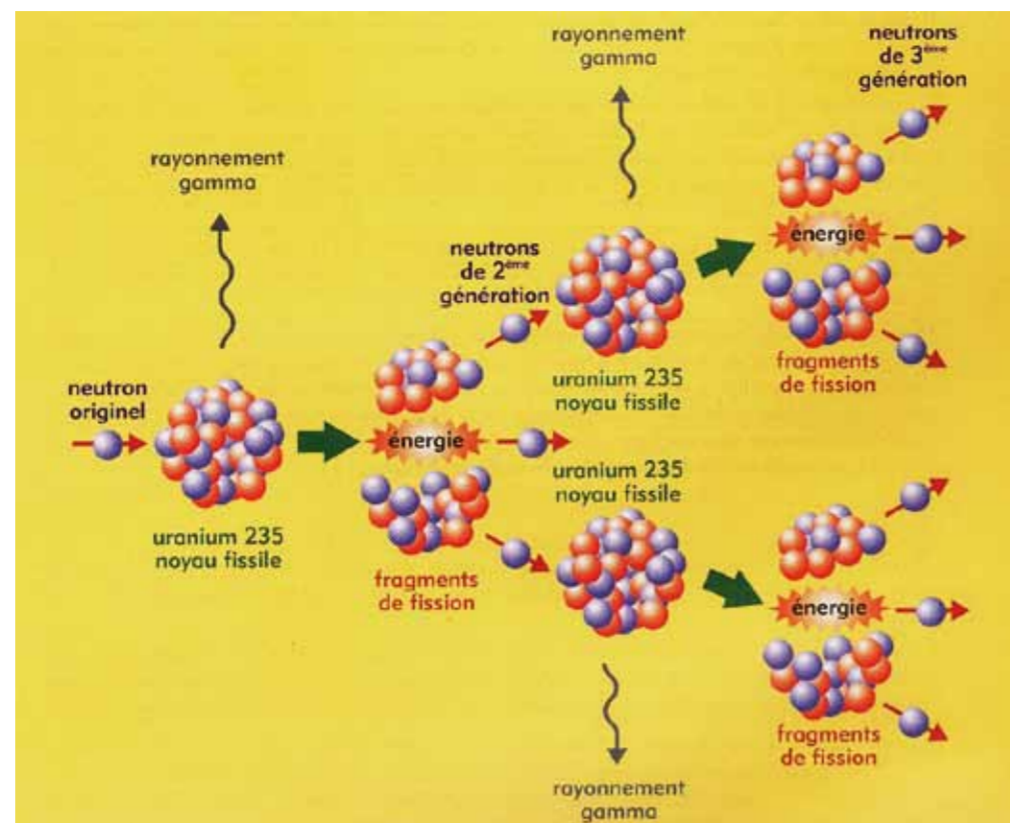
En 1939, au moment où précisément la seconde guerre mondiale se déclenche, cette découverte tombe très mal. Une course de vitesse s'engage immédiatement entre l'Allemagne nazie et les Alliés pour tenter de parvenir avant l'autre camp à la maîtrise de cette nouvelle et fabuleuse source d'énergie. Malheureusement, la première application fut militaire. L'opinion découvrit l'énergie nucléaire avec stupéfaction et effroi à travers la destruction les 6 et 9 août 1945 d'Hiroshima et de Nagasaki. Pour beaucoup, cette découverte brutale donna de l'énergie nucléaire une image terrifiante et négative dont elle n'est jamais parvenue à se départir, et ce malgré le temps et ses utilisations pacifiques purement civiles.

1-2 LE PRINCIPE DE LA FISSION

La « fission » d'un atome est une réaction nucléaire au cours de laquelle un neutron (dont il sera précisé ultérieurement l'origine !) entre en collision avec le noyau atomique d'un élément de masse élevée (uranium, plutonium...) provoquant l'éclatement, la « fission », de ce noyau en plusieurs fragments (figure 2). Les fragments émis lors de la fission sont les **produits de fission** et des **neutrons dits prompts ou rapides**. Ces fragments sont animés d'une vitesse importante et leur énergie cinétique constitue la majeure partie de l'énergie dégagée lors de la fission. L'autre partie de l'énergie de fission sera émise ultérieurement, de manière plus ou moins différée, par rayonnement, bêta, gamma ou X suite à des modifications ou à des ajustements énergétiques internes aux noyaux des produits de fission nouvellement formés.

2) Principe de la réaction de fission de l'uranium 235

Lorsqu'un neutron incident (à gauche sur le schéma) entre en collision avec un noyau d'uranium ou de plutonium, dans un premier temps il est absorbé par ce noyau. Le nouveau noyau ainsi constitué est très instable et, rapidement, se scinde en deux fragments principaux, les **produits de fission**, et libère entre 2 et 3 neutrons que l'on appelle **neutrons prompts**.



3 Schéma de principe de la réaction de fission en chaîne

Les neutrons prompts sont émis avec des vitesses élevées, proches de 20 000 kilomètres par seconde...

La fission d'un atome (atome dit fissile) s'accompagne d'un très important dégagement d'énergie, de l'ordre de 200 MeV (millions d'électrons volts). Ainsi exprimée, en méga électronvolts, cette quantité d'énergie libérée par un atome fissile ne « parle » pas beaucoup sauf si on compare cette quantité d'énergie à l'énergie chimique dégagée par la combustion d'un atome de carbone. Cette dernière est de 4 électronvolts, soit des dizaines de millions de fois plus faible... La quantité d'énergie dégagée par une seule réaction nucléaire est donc des millions de fois plus importante que celle dégagée par une seule réaction chimique.

L'énergie de fission d'un atome d'uranium 235 se répartit entre l'énergie cinétique des produits de fission (87%), l'énergie cinétique des neutrons prompts (3%) et l'énergie des différents rayonnements différés β , γ ou X (10%) émis ultérieurement lors de la désintégration radioactive des produits de fission.

Notons dès à présent que lorsqu'on arrête un réacteur nucléaire, l'énergie dégagée sous forme de chaleur par le combustible ne s'annule pas avec l'arrêt de la réaction nucléaire de fission. La désintégration radioactive différée des produits de fission et l'émission des rayonnements associés à ces désintégrations continuent à dégager de l'énergie. Immédiatement après l'arrêt du réacteur cette énergie, dite **énergie résiduelle**, peut représenter jusqu'à 10% de la puissance nominale du réacteur. Quelle que soit la raison pour laquelle un réacteur a été arrêté, cette énergie doit impérativement être évacuée sous peine d'entraîner une fusion plus ou moins complète du cœur du réacteur comme ce fut le cas à Fukushima et à Three Mile Island (voir à ce sujet le chapitre consacré à la sûreté et aux accidents).

4) Pour en savoir plus L'origine de l'énergie dégagée lors d'une fission (ou d'une fusion)

1-3 LE PRINCIPE DE LA RÉACTION DE FISSION EN CHAÎNE ET DE SON ENTRETIEN

Elle est schématisée à la figure 3. Dans une réaction de fission en chaîne, un ou plusieurs des neutrons prompts émis lors de la réaction (ces neutrons sont dits de seconde génération par rapport au neutron « original ») peuvent à leur tour entrer chacun en collision avec un noyau fissile en provoquant sa fission. Les nouvelles fissions libèrent à leur tour des neutrons prompts (neutrons de troisième génération) qui, comme les précédents, peuvent être à l'origine de nouvelles fissions. Le processus de réaction en chaîne se perpétue ainsi de génération en génération. Ce processus doit être contrôlé (voir le en savoir plus sur le contrôle de la réaction en chaîne).

On définit un coefficient « k », appelé **facteur de multiplication**, qui est égal au rapport du nombre de fissions dénombrées entre une génération et la génération suivante. Dans le schéma de principe de la figure 3, une fission engendrant 2 fissions à la génération suivante, ce coefficient est de 2. Si ce facteur k est supérieur à 1, le nombre de neutrons croît très rapidement, de manière exponentielle. S'il est inférieur à 1 le nombre de neutrons émis diminue de génération en génération et la réaction s'arrête spontanément. Si k = 1 la réaction en chaîne se perpétue de manière stable, le nombre de fissions ne varie pas d'une génération à la suivante.

5) La réaction en chaîne

Le temps séparant deux générations de neutrons prompts se compte en microsecondes. Dans le schéma de la figure 2, la population de neutrons prompts doublant à chaque génération (toutes les microsecondes !), la réaction en chaîne serait parfaitement incontrôlable et deviendrait instantanément explosive. Un tel schéma de principe est celui d'une arme nucléaire. Un réacteur nucléaire destiné à la production d'énergie est évidemment conçu et piloté pour qu'il ne puisse jamais en être ainsi. Facile à écrire mais beaucoup plus difficile, non pas à faire mais à expliquer... tentons cependant de le faire simplement ! Pour être capable de contrôler une réaction en chaîne, le principe de base est le suivant : **la population des neutrons prompts doit toujours avoir tendance à décroître spontanément d'une génération à la suivante** et la réaction en chaîne avoir tendance, en conséquence, à s'éteindre par elle-même.

Pardon pour le rapprochement démographique sans doute osé, mais il est très explicite : la population des neutrons prompts doit être semblable à une population vieillissante dont le taux de fécondité insuffisant ne lui permet plus d'assurer son renouvellement d'une génération à la suivante, et donc sa perpétuation. Une telle population s'éteint d'elle-même. En d'autres termes plus savants, pour contrôler une réaction en chaîne, le facteur de multiplication k des neutrons prompts doit toujours rester inférieur à 1. Comment alors entretenir de manière stable une réaction en chaîne ? Comment compenser le « déficit » en neutrons prompts d'une génération à la suivante ? Comment faire en sorte que le facteur k soit globalement maintenu égal à 1 ?

Pour ce faire, en complément à la population des neutrons prompts, il est fait appel à une autre population de neutrons, celle dite des « **neutrons retardés** ». Contrairement aux neutrons prompts immédiatement émis lors d'une fission, les neutrons retardés ne sont pas émis lors de la fission mais ultérieurement, lors de la désintégration radioactive des produits résultant de la fission. Cette **désintégration radioactive survient de manière différée par rapport à la fission** avec un retard allant de quelques secondes à plusieurs minutes (en moyenne de 10 à 11 secondes) après la fission. Le secret du pilotage d'un réacteur tient en ce que le **déficit en neutrons prompts est compensé par l'émission différée de neutrons retardés**. C'est le retard avec lequel la compensation est réalisée qui permet de disposer d'un temps de réponse suffisamment long (et confortable !) pour piloter et contrôler sereinement la réaction en chaîne. Outre ce mécanisme fondamental de compensation, la sécurité du pilotage est par ailleurs assurée par d'autres phénomènes auto-stabilisants qui ont tous tendance à étouffer la réaction en chaîne lorsque la puissance ou la température du cœur d'un réacteur ont tendance à croître. Le principal de ces effets est l'**effet Doppler** de température. Il a pour effet de diminuer spontanément la réactivité (en gros le coefficient « k ») lorsque la température du combustible a tendance à croître.

4) Le contrôle de la réaction en chaîne

1-4 LES DEUX TYPES DE RÉACTIONS EN CHAÎNE

Il existe deux grands types de réactions en chaîne. Dans le premier type de réacteurs, les neutrons prompts provoquent directement des fissions sans, qu'au préalable, ils aient été ralentis. Dans le second type, les neutrons prompts sont préalablement ralentis, modérés, avant d'aller provoquer de nouvelles fissions. Explications : - la probabilité pour qu'un neutron absorbé par un noyau fissile provoque sa fission est fonction de la vitesse de ce neutron, c'est à dire de l'énergie cinétique qu'il possède au moment de sa rencontre avec le noyau fissile. - curieusement, cette probabilité n'est importante que pour deux plages de vitesse (ou d'énergie cinétique). La première plage correspond à une vitesse très élevée, pratiquement celle à laquelle un neutron prompt est émis lors d'une fission, soit 20 000 km/seconde, la seconde plage correspondant à une vitesse très faible, à une énergie cinétique d'un neutron dit « thermique » dont l'énergie n'est que de seulement quelques centièmes d'électronvolt.

Les neutrons sont dits « thermiques » en référence à leur énergie cinétique proche de l'énergie cinétique thermique qu'aurait le noyau atomique de l'hydrogène (un proton de masse équivalente à celle du neutron), à une température égale à celle du fonctionnement des réacteurs (se référer aux « Quelques notions de physique », au chapitre consacré à l'agitation thermique des gaz).

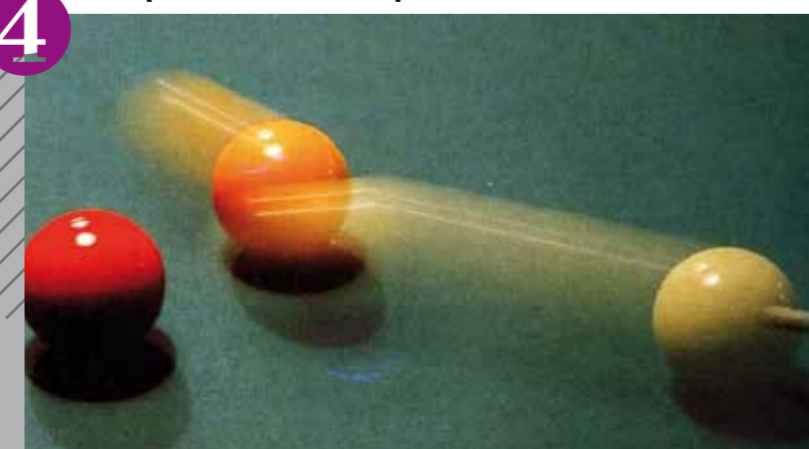
Le premier type de fission, sans modulation, est celui réalisé dans les réacteurs dits à neutrons rapides, le second, avec modulation, dans des réacteurs dits à modérateur ou à neutrons thermiques.

1-5 LES RÉACTEURS AVEC MODÉRATION DES NEUTRONS (RÉACTEURS THERMIQUES)

Les réacteurs les plus couramment construits et exploités sont du second type, avec modérateur, à neutrons thermiques. Avant de provoquer une nouvelle fission les neutrons prompts sont ralentis et amenés à l'état énergétique requis à l'aide d'un modérateur. Lorsqu'un neutron percute le noyau atomique d'un matériau modérateur (hydrogène, carbone...), au cours du choc, il échange avec celui-ci une partie de son énergie cinétique. Le ralentissement d'un neutron s'effectue ainsi, progressivement, par collisions successives avec les noyaux atomiques du modérateur.

4) Principe du ralentissement par chocs successifs

4) Principe du ralentissement par chocs successifs



Dans une première approche la comparaison entre la modulation des neutrons et le jeu de billard n'est pas scandalement fautive ! Les boules de billard ayant la même masse, la boule blanche lancée depuis la droite cèdera la moitié de son énergie cinétique à la boule orange lors de leur collision. Par la suite, en allant frapper la boule rouge, la boule blanche cèdera de nouveau la moitié de l'énergie qui lui reste à la boule orange... et ainsi de suite.

5) Principe du ralentissement par chocs successifs

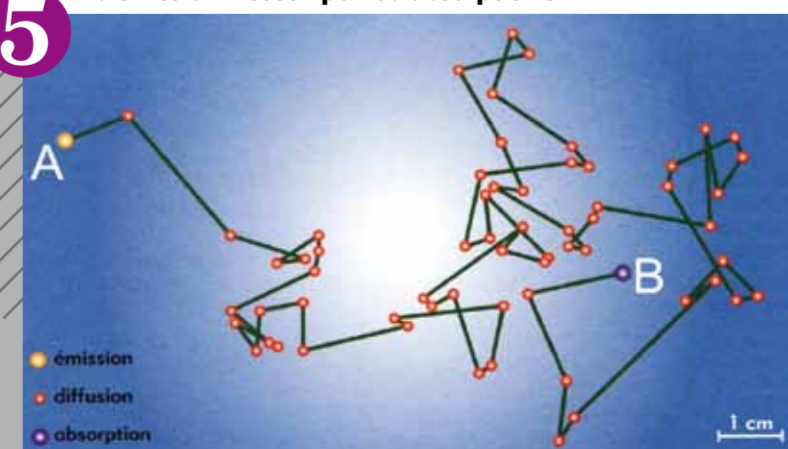
Il en est de même du parcours d'un neutron dans un milieu modérateur. Son parcours s'apparente à celui de la boule blanche, le neutron perdant une partie de son énergie à chaque collision. La distance séparant deux noyaux atomiques est considérable vis-à-vis de leur taille. Les neutrons étant électriquement neutres, la distance qu'ils doivent parcourir entre deux collisions successives est importante, de l'ordre du centimètre. Avant d'atteindre l'énergie correspondant à l'état thermique, le ralentissement d'un neutron nécessite une quarantaine de collisions entre le point A de son émission par fission et le point B de sa capture à l'état thermique (figure 5).

5) Cheminement d'un neutron entre son point d'émission A et son point d'absorption B

Poursuivons le parallèle avec le billard. Le modérateur idéal serait une particule atomique de masse égale à celle du neutron. Le meilleur candidat est donc a priori le noyau atomique de l'hydrogène constitué par un seul proton dont la masse est très proche de celle du neutron. Dans la pratique, le matériau modérateur utilisé sera un matériau comportant des atomes d'éléments légers se trouvant au début de la classification périodique à savoir l'hydrogène, le deutérium, le béryllium... le carbone (le diamant étant très cher, on lui préférera le graphite !). Un modérateur est choisi en fonction de sa capacité à amener rapidement les neutrons à l'état thermique (avec le minimum de collisions)... mais il devra, de plus, en absorber le moins possible.

L'eau ordinaire (dite **eau légère**) est a priori un bon modérateur dans la mesure où sa molécule contient deux atomes d'hydrogène et... qu'elle ne coûte pas trop cher ! Cependant le noyau d'hydrogène ayant une fâcheuse tendance à absorber les neutrons pour former du deutérium, l'usage de l'eau légère en tant que modérateur ne peut s'envisager qu'à la condition d'utiliser un combustible enrichi en uranium 235 fissile. Un parc de production constitué de réacteurs à eau légère doit donc disposer de capacités d'enrichissement de l'uranium naturel en uranium 235. Les autres modérateurs couramment retenus dans les réacteurs sont l'eau lourde D₂O et le carbone sous sa forme graphite. Dans la molécule d'eau lourde, le deutérium (dont le noyau est formé d'un proton et d'un neutron) remplace l'hydrogène de la molécule de l'eau légère. Ces deux modérateurs ne nécessitent pas d'enrichir le combustible, le combustible de ces réacteurs est donc uniquement composé d'uranium naturel.

Cheminement d'un neutron entre son point d'émission A et son point d'absorption B



La première filière nucléaire exploitée en France reposait sur des réacteurs dont le combustible était constitué d'uranium naturel, le modérateur était du Graphite et le fluide de refroidissement du Gaz carbonique, d'où son nom « **UNGG** ».

2) Les deux uraniums et le bilan du fonctionnement d'un réacteur nucléaire

2-1 L'URANIUM NATUREL, LES URANIUMS 235 ET 238

L'uranium est un élément largement réparti dans l'écorce terrestre, dans la plupart des roches magmatiques volcaniques ou plutoniques (granites) et dans l'eau des océans. Il y est présent, mais toujours en faible concentration. Dans la lithosphère la teneur moyenne en uranium varie entre 3 et 4 grammes par tonne de roches (3 à 4 parties par million, symbole : ppm). Dans un minerai exploitable, la concentration en uranium naturel est plus élevée, de l'ordre de quelques kg d'uranium par tonne de minerai. Compte tenu des faibles concentrations de l'uranium dans les minerais, une première concentration est généralement effectuée sur le gisement même. Par extraction chimique de l'uranium du minerai broyé on obtient une poudre jaune (yellow cake figure 6) contenant de 60 à 70% d'uranium.

Cette poudre jaune vif est par la suite transformée en composé gazeux, l'hexafluorure d'uranium, en vue des opérations d'enrichissement soit par diffusion gazeuse soit par ultracentrifugation. L'enrichissement est destiné à augmenter la concentration en uranium 235 fissile de 0,7% à quelques pourcents (de 3 à 3,5 %) qui est la concentration requise pour la fabrication du combustible des réacteurs à eau légère. Finalement l'uranium enrichi est utilisé dans les réacteurs sous forme de pastilles d'oxyde réfractaire, de formule chimique UO₂.



6) Yellow cake, oxyde d'uranium

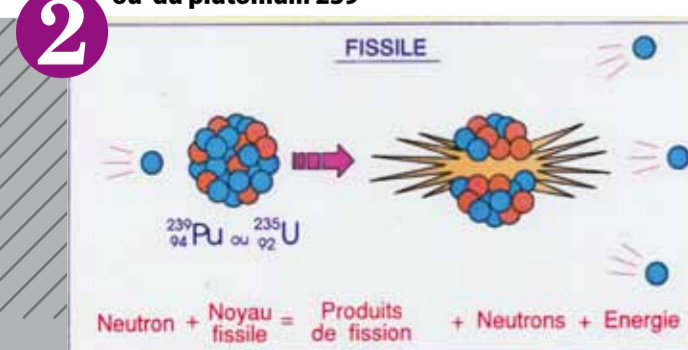
2-2 LES URANIUMS 235 ET 238

L'uranium naturel comporte deux isotopes : l'uranium 235 (composé de 92 protons et de 143 neutrons) et l'uranium 238 (composé de 92 protons et 146 neutrons). Dans un kilogramme d'uranium naturel extrait des gisements, on trouve systématiquement la même répartition entre les deux isotopes, 7 grammes d'uranium 235 pour 993 grammes d'uranium 238 (sauf exception, voir le pour en savoir plus sur les réacteurs naturels d'Oklo). En pratique, seul l'uranium 235 est fissile, c'est-à-dire utilisable dans les réacteurs des premières générations UNGG, les réacteurs à neutrons thermiques à eau pressurisée ou bouillante.



1 La première bombe lancée sur Hiroshima
Hiroshima 8h15 le 6 août 1945

2) Principe de la réaction de fission de l'uranium 235 ou du plutonium 239

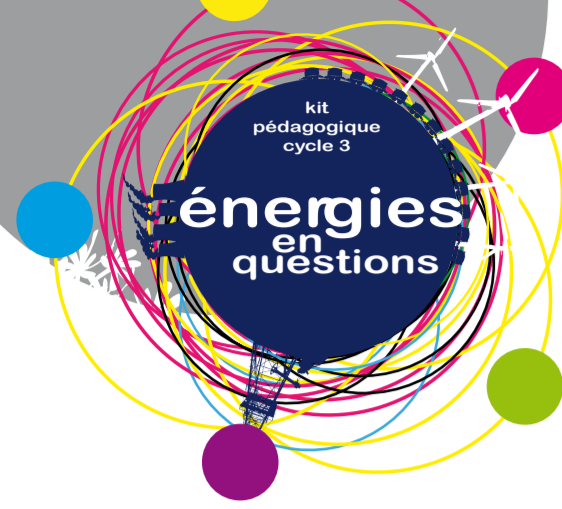


4) L'origine de l'énergie dégagée lors d'une fission (ou d'une fusion)

Si l'on pouvait mesurer la masse du noyau d'un atome d'uranium avant sa fission et la masse des divers produits résultant de la fission (produits de fission et neutrons émis), on s'apercevrait que le total des masses des produits résultant de la fission est inférieur à la masse initiale du noyau d'uranium ! Au cours de la fission de la masse a disparu en fine, il « manque de la masse » ! Si on appelle « Δm » ce manque de masse (scientifiquement appelé défaut de masse), la relation entre l'énergie E dégagée par la fission et ce défaut de

masse est donnée par la célèbre relation d'Einstein établissant l'équivalence entre la masse et l'énergie : $E = \Delta m C^2$ (où C est la vitesse de la lumière) Ainsi, lors d'une fission une partie (Δm) de la masse du noyau d'uranium s'est transformée en énergie E correspondant à l'énergie cinétique des divers fragments résultant de la fission et à celle des rayonnements émis ultérieurement. Le défaut de masse est extrêmement ténu, pour une énergie de 200 MeV dégagée par une fission, la

perte de masse n'est que de $3,6 \times 10^{-25}$ gramme... soit un nombre constitué de 25 zéros après la virgule avant de trouver le premier chiffre significatif ! Les 420 milliards de kilowattheures d'électricité d'origine nucléaire produite annuellement en France (soit 78 % de la production totale d'électricité) correspondent à la transformation d'environ 16 kilogrammes de matière en énergie...



A priori la nature n'est donc pas très généreuse puisque seulement 0,7% de l'uranium naturel est fissile et directement utile à la production d'énergie. Les 99,3% d'uranium 238 non fissile sont à priori stériles.

Les 99,3 % d'uranium 238 sont stériles mais à priori seulement car il existe une possibilité de générer de la matière fissile, et donc de l'énergie, à partir de l'uranium 238.

Par quel processus ? En voici la description :
 - dans un combustible nucléaire les uraniums 235 et 238 sont intimement mélangés,
 - lors du fonctionnement du réacteur, l'uranium 238 est soumis au flux des neutrons produits par les fissions de l'uranium 235 fissile,
 - les noyaux d'uranium 238 non fissile capturent certains de ces neutrons et se transforment en terme en noyaux de « **plutonium 239** »

- les noyaux de plutonium 239 ainsi obtenus sont « **fissiles** » au même titre que l'uranium 235, La conversion de l'uranium 238 stérile en plutonium 239 fissile est une réaction inhérente au fonctionnement de tous les réacteurs nucléaires dès lors que leur combustible est constitué d'un mélange des deux uraniums. Un réacteur classique de la filière exploitée en France produit environ 300 kilogrammes de plutonium par an. Certains types de réacteurs, les **surgénérat**eurs, sont spécifiquement conçus et exploités pour optimiser et maximaliser cette conversion. La quantité de matière fissile qu'ils sont en mesure de produire lors de leur fonctionnement en puissance est supérieure à la quantité de matière fissile qu'ils consomment (voir le chapitre sur la surgénération et réacteurs de 4^{ème} génération).

2-3 LES ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES (DESCRIPTION RELATIVE AUX RÉACTEURS REP 1300 MW).

L'oxyde d'uranium enrichi entre 3 et 3,5% d'uranium 235 est conditionné sous forme de pastilles cylindriques de céramique réfractaire (diamètre 8,2 mm hauteur de 13,5 mm). Ces pastilles sont empilées sur une hauteur d'environ 4,30 m dans un tube en alliage de zirconium, la **gaine**. L'ensemble gaine et pastilles constitue un **crayon**. Un **assemblage combustible** est un faisceau de section carrée haut de 4,8 m comportant 264 crayons Un assemblage renferme 611 kg d'oxyde d'uranium.

7 **Élément combustible, centrales REP**

Le cœur d'un réacteur de 1300 MW comporte 193 assemblages combustibles, la forme générale du cœur est assez proche de celle d'un cylindre.

Un assemblage combustible reste entre 3 et 4 ans en réacteur, les assemblages sont renouvelés partiellement au cours d'arrêts pour rechargement. Initialement un renouvellement partiel avait lieu chaque année, pour des raisons d'optimisation cette périodicité évolue, la période séparant deux renouvellements a été allongée.

2-4 BILAN DU FONCTIONNEMENT D'UN RÉACTEUR (EAU PRESSURISÉ REP 900 MWE)

a) Bilan neutronique. Tous les neutrons émis lors des fissions ne participent pas à la continuation de la réaction de fission en chaîne, un

peu plus d'un tiers seulement y participent. Les neutrons qui n'y participent pas sont soit capturés pour former du plutonium 239 soit absorbés de manière stérile par les structures, les barres de commande, l'eau de refroidissement... etc.

+ **Pour en savoir plus**
Le bilan neutronique des réacteurs à eau pressurisée

b) Le bilan des matières. (Voir le savoir plus « bilan matière »).

Il est établi pour une quantité d'énergie donnée, généralement pour un térawattheure (un milliard de kilowattheure).

A l'amont il donne la quantité et l'enrichissement de l'uranium chargé dans le réacteur pour fournir cette énergie.

A l'aval, il donne les quantités de matière nucléaire extraite lors du déchargement. Les quantités d'uraniums consommées, les quantités de produits de fission classés selon leur période radioactive (leur durée de vie), des différents plutoniums (fissiles ou non) et les transuraniens, neptunium (Np), américium (Am), curium (Cm).

Le bilan établi pour une production électrique nette de 1 Térawattheure (un milliard de kWh)

- pour produire 1 TWh, 3893 kg d'uranium enrichi sont chargés dans le cœur du réacteur, dont 136 kg d'uranium 235,

- pendant le fonctionnement tout l'uranium 235 n'est pas été consommé. Sur les 136 kg initialement chargés il en reste 40 kg au déchargement. des produits de fission et de l'uranium 236 ont été générés.

- le plutonium fissile (Pu 239 et 241) formé pendant le fonctionnement a participé à la production d'énergie et a lui-même généré des produits de fission.

- différents isotopes du plutonium (238 à 242) se sont formés ainsi que des actinides mineurs (neptunium, américium...).

Enfin pour une production de un térawattheure électrique, le bilan matière détaillé s'établit ainsi :

Au chargement : total uranium 3893 kg dont 136 kg d'uranium 235,

Au déchargement :

- Uranium 235 :	40 kg
- Uranium 236 :	16 kg
- Uranium 238 :	3 661 kg
Total Uranium :	3 717 kg
- Plutonium 238 :	0,6 kg
- Plutonium 239 :	22,3 kg
- Plutonium 240 :	8,6 kg
- Plutonium 241 :	4,6 kg
- Plutonium 242 :	1,9 kg
Total plutonium :	38,0 kg
Total actinides mineurs (Np, Am, Cm)	2,9 kg
- Produits de fission à vie courte < 10 ans	119,6 kg
- à vie moyenne :10 à 30 ans, Cs137, Sr 90	6,3 kg
- à vie longue >100 ans, Tc 99, Zr 93, I 129	9,1 kg
Total des produits de fission	135 kg

+ **Le bilan matière des réacteurs 900 MWélectriques (Fessenheim et Bugey)**

3) Les produits de fission

Un chapitre entier leur est consacré car la présence des produits de fission radioactifs dans le combustible que l'on décharge des réacteurs constitue le défi majeur que l'industrie nucléaire doit relever.

Leur présence constitue l'essentiel des problèmes à affronter tant sur le court terme, pendant la phase d'exploitation, que sur le long et le très long terme, afin d'éviter leur dissémination et assurer en toutes circonstances la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants qu'ils émettent.

3-1 LA RADIOACTIVITÉ DES PRODUITS DE FISSION, SON ORIGINE

Les produits de fission résultant de la fission des noyaux d'uranium ou de plutonium sont tous radioactifs. D'où provient cette radioactivité ?

Pour l'expliquer considérons le cas de la fission d'un noyau d'uranium 235 (92 protons et 143 neutrons) et supposons, pour simplifier notre raisonnement, que la fission ait généré **trois neutrons prompts** et deux **produits de fission** parfaitement identiques (figure 2).

Trois neutrons prompts ayant été émis, les protons et les neutrons se répartissent également entre deux noyaux identiques, il en résulte que le noyau des produits de fission créés comporteront chacun 92/2, soit 46 protons et (143-3) / 2, soit 70 neutrons.

Un noyau comportant 46 protons est le noyau d'un élément appelé palladium, comportant 70 neutrons, il s'agit du noyau de l'isotope 116 du palladium (46 protons + 70 neutrons).

La consultation du tableau répertoriant les isotopes stables et radioactifs de tous les éléments de la création montre que les seuls isotopes stables du palladium sont les isotopes 102, 104, 105, 106, 108 et 110, ce dernier isotope 110 comporte le plus grand nombre possible de neutrons, à savoir 64 (110 neutrons - 46 protons).

Avec 70 neutrons, le noyau de l'isotope 116 du palladium comporte 6 neutrons en excès par rapport à l'isotope 110 stable du palladium, cet excès le rend instable. En un mot il est radioactif et se désintégrera à terme par radioactivité β-

Le tableau des isotopes radioactifs montre qu'effectivement, avec une période de 12,7 secondes, un des neutrons du noyau de palladium 116 se transformera en un proton créant ainsi un nouveau noyau comportant 47 protons. Le nouveau noyau comportant 47 protons est celui de l'argent 116.

Le tableau précédent montre que le nouveau noyau est lui-même radioactif (dommage pour les bijoutiers !). Toujours par radioactivité β-, un de ses neutrons se transformera à son tour en proton et donnera naissance à un noyau de cadmium 116 comportant 48 protons. Le cadmium 116 étant stable, la chaîne des désintégrations β-s'arrête à cet isotope 116 du cadmium.

En résumé, dans notre exemple, par désintégrations successives du palladium en argent, puis de l'argent en cadmium, la fission initiale de l'uranium 235 a produit trois neutrons prompts, deux atomes stable de cadmium 116 et émis des rayonnements β- et γ associés aux désintégrations radioactives successives du palladium 116 puis de l'argent 116.

3-2 LA DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE DES PRODUITS DE FISSION

Généralisons l'exemple ci-dessus, qui n'est qu'un des multiples scénarios possibles de fission, à l'ensemble des produits créés lors des fissions :

a) Tous les produits de fission sont radioactifs. Ils comportent dans leurs noyaux un excédent de neutrons, cet excédent étant, selon les cas, de 1 à 8 neutrons par rapport au nombre admissible de neutrons dans un noyau stable. Cet excédent provient du fait que, par rapport au nombre de protons, le noyau d'uranium contient la proportion de neutrons la plus élevée de tous les éléments. Lors de la fission de l'uranium, le partage des neutrons fait inévitablement apparaître un excédent de neutrons dans chacun des noyaux des produits de fission. Dans notre exemple, l'excès était de 6 puisque le noyau de palladium généré comportait 70 neutrons alors que les isotopes stables du palladium ne peuvent en comporter que 64 au maximum.

b) Au moment de la fission, qui constitue pour le noyau d'uranium un événement cataclysmique, la répartition des protons et des neutrons entre les produits de fission se fait dans « la fureur et la précipitation » et donc un peu « n'importe comment ». Il existe de ce fait une multitude de scénarios de fission différents aboutissant à la création de plusieurs centaines d'isotopes radioactifs eux-mêmes différents.

Les scénarios de fission les plus probables sont dissymétriques (contrairement à l'exemple symétrique pris pour la commodité du raisonnement) et conduisent à la création d'éléments de masses atomiques différentes. Les masses atomiques les plus fréquemment rencontrées sont voisines de 95 et de 140 (on remarquera au passage que 95 + 140 = 235 qui est précisément la masse atomique de l'uranium 235 fissile).

Les masses atomiques voisines de 140 correspondent aux isotopes radioactifs du tellure, de l'iode, du xénon, du césium et de baryum. Les masses atomiques voisines de 95, aux isotopes du krypton, du rubidium, du strontium, de l'yttrium et du zirconium.

Ces noms ne sont pas inconnus du public, ce sont ces éléments que l'on trouve le plus fréquemment sous forme de gaz ou d'aérosols transportés par les vents dans les rejets émanant des centrales accidentées de Tchernobyl et de Fukushima ou répandus (et en beaucoup plus grande quantité !) dans les années 60 par les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère.

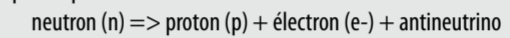
c) La longueur de la chaîne des désintégrations radioactives β- conduisant d'un produit de fission à un élément final stable peut comporter de 1 à 7 ou 8 étapes selon le nombre initial de neutrons excédentaires. Le processus de désintégration β- se poursuit jusqu'à ce que le nombre de protons et de neutrons d'un noyau corresponde à une structure stable. La chaîne de désintégration s'arrête lorsqu'elle aboutit à cet élément stable. Dans notre exemple, la chaîne comportait deux étapes, passant du palladium 116 à l'argent 116 pour aboutir au cadmium 116 stable.

d) A chaque étape de la cascade des désintégrations, un électron est émis sous la forme d'un rayonnement bêta moins ainsi qu'un rayonnement γ ou X associé à la désintégration.

+ **Pour en savoir plus**
La radioactivité β-

L'énergie dégagée par ces rayonnements est très importante : juste après l'arrêt d'un réacteur elle est peut atteindre jusqu'à 10% de la puissance maximale du réacteur. Cette puissance est appelée **puissance résiduelle**. Elle décroît assez rapidement car la plupart des produits de fission ont des périodes très courtes (se comptant en secondes, en heures ou en jours).

Au cours d'une désintégration β- un des neutrons excédentaires d'un noyau se transforme en proton. Le nouveau noyau obtenu a la même masse atomique que le noyau initial mais comporte un proton en plus et un neutron en moins. La désintégration d'un neutron en un proton peut se schématiser ainsi :



Un proton s'étant formé à partir d'un neutron, la radioactivité β- s'accompagne obligatoirement de l'émission d'un électron (e-) éjecté hors du nouveau noyau.

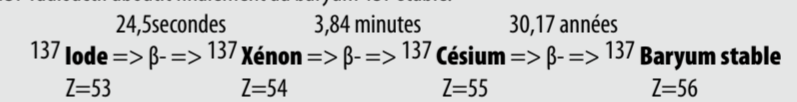
Premier constat : l'électron étant électriquement chargé, l'émission de cet électron est un **rayonnement ionisant** c'est-à-dire interagissant avec la matière, qu'elle soit vivante ou inerte.

Second constat : l'énergie de cet électron est variable, elle est comprise entre un minimum et un maximum. Conséquence de cette variabilité : le nouveau noyau obtenu n'est pas dans son état énergétique fondamental stable, il est **excité**. Le retour à l'équilibre (la **désexcitation**) s'effectue en « évacuant » l'énergie excédentaire interne au noyau par l'émission d'un **rayonnement électromagnétique, gamma ou X** qui peut être très énergétique.

Sauf exception la désintégration β- s'accompagne toujours de l'émission d'un rayonnement γ ou X. Ci-dessous, deux exemples de désintégration β- parmi les plus significatifs :

Nota : la ligne supérieure (au-dessus du signe β-) indique la période de désintégration radioactive (temps en secondes, minutes ou années). Situé sous le nom de l'élément, Z est le nombre atomique de cet élément (le nombre de protons de son noyau). Le nombre situé en haut à gauche de l'élément est sa masse atomique, elle est égale à la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons.

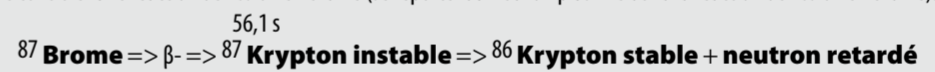
a) Le premier exemple est relatif à la désintégration de l'iode 137 en xénon 137 puis en césium 137 de période 30,17 ans. Cette chaîne de désintégrations est importante, elle produit le césium 137 qui est le marqueur à moyen terme de la contamination des sols par les retombées des essais nucléaires militaires et des accidents de Tchernobyl et de Fukushima. Le césium 137 radioactif aboutit finalement au baryum 137 stable.



b) Second exemple est relatif à la désintégration du brome 87 en krypton 87 avec une période de 56,1 secondes. Le noyau de krypton 87 éjecte un neutron excédentaire pour aboutir au krypton 86 stable.

Ce second type de désintégration a été pris en exemple car il montre un des scénarios qui, à partir des produits de fission, génèrent les **neutrons retardés**.

Rappelons que les neutrons retardés sont nécessaires au pilotage des réacteurs, sans eux il serait impossible de maîtriser et de contrôler une réaction de fission en chaîne (se reporter au « Savoir plus » relatif à la réaction de fission en chaîne).



+ **La radioactivité β-**

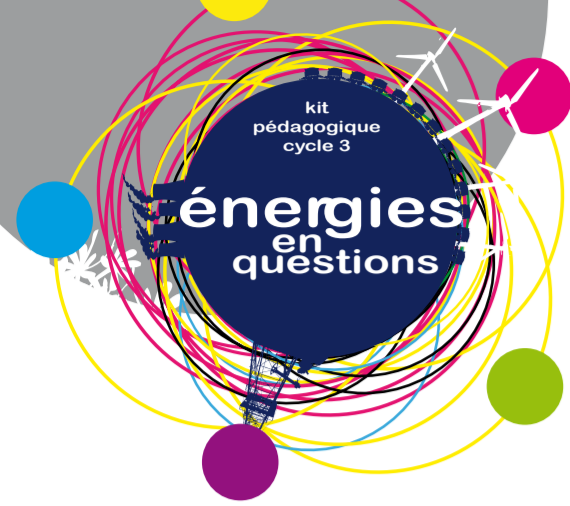
La puissance résiduelle reste cependant suffisamment élevée pour qu'il soit nécessaire de poursuivre le refroidissement d'un réacteur à l'arrêt par des systèmes spécifiques de refroidissement. Après déchargement, la puissance résiduelle dégagée par le combustible nécessite de poursuivre son refroidissement, généralement en piscine et sous eau, pendant plusieurs années.

+ **Le bilan neutronique des réacteurs à eau pressurisée**

Si on considère une première génération de 100 neutrons prompts venant d'être émis, - 38 d'entre eux vont effectivement provoquer 38 nouvelles fissions qui elles-mêmes vont émettre 100 neutrons prompts de seconde génération. Ces 38 neutrons perpétuent la réaction en chaîne, - 29 autres seront capturés soit par des noyaux d'uranium 238 pour former in fine du plutonium 239, soit par des noyaux de plutonium 239 déjà formés pour créer d'autres isotopes du plutonium, les isotopes 240, 241 et 242. Il est à noter que seuls les isotopes impairs (239, 241) du plutonium sont fissiles et participent à la production

d'énergie dès qu'ils sont créés. Les isotopes pairs (240, 242) sont des « neutrophages », ils absorbent les neutrons sans se fissionner. Cette particularité mérite d'être soulignée car ces isotopes pairs vont, au fur et à mesure de leur production, progressivement « empoisonner » le plutonium produit dans les réacteurs à usage civil et le rendre impropre à toute utilisation militaire. Pour les organismes de contrôle internationaux, il suffit d'observer la manière dont un réacteur nucléaire est exploité (notamment la périodicité à laquelle les opérations de renouvellement du combustible sont ef-

fectuées) pour savoir si ce réacteur est exploité ou non à des fins militaires. Des opérations de rechargement fréquentes, favorisant la fabrication de plutonium 239 presque pur, feront suspecter une production optimisée de plutonium 239 et donc une utilisation du réacteur à des fins militaires - 33 neutrons enfin sont capturés ou absorbés de manière stérile par les structures du réacteur, par le fluide primaire de refroidissement, par les barres de commande, par certains produits de fission (xénon, samarium...) et par les actinides mineurs (neptunium, américium).



Le circuit primaire. L'eau primaire entre dans le réacteur à une température de 280°C environ, elle s'y chauffe au contact du combustible et ressort à 320°C. Pour que l'eau primaire puisse rester à l'état liquide à de telles températures, elle est maintenue à très haute pression, « **pressurisée** », à une pression de 155 bars (d'où le nom générique donné à ce type de réacteur « à eau pressurisée », PWR en anglais, REP en français). La pression est régulée à l'aide d'un pressuriseur placé en dérivation sur une des boucles de refroidissement de la chaudière (figure 2).

Le circuit primaire des centrales REP 900 MW comporte 3 boucles, les REP 1300 et 1600 MW en comportent 4. Chaque boucle dispose d'une pompe primaire dont le débit est de 21 500 m³ par heure et d'un générateur de vapeur.

L'eau primaire à 320 °C entre dans les générateurs de vapeur par la partie inférieure et circule dans une série de tubes en forme de U renversé (3400 tubes par générateur de vapeur pour les REP 900 MW) et cède sa chaleur à l'eau secondaire en provenance de la partie conventionnelle. L'eau secondaire (en bleu sur le schéma général) entre dans le générateur de vapeur à 220°C, se chauffe au contact des tubes en U puis se vaporise. A la puissance nominale, chaque générateur de vapeur fournit 1 800 tonnes par heure de vapeur saturée sous une pression de 57,7 bars à une température de 273°C. A la sortie du générateur de vapeur, avant d'envoyer la vapeur vers la turbine, un séparateur sépare la vapeur de l'eau qu'elle aurait pu entraîner.

Le circuit secondaire. Après avoir cédé son énergie thermique à la turbine qui la transforme en énergie mécanique, la vapeur sort de la turbine à très basse pression (45 millibars absolus) et est condensée (retourne à l'état d'eau liquide) dans un condenseur. Le condenseur est refroidi soit par l'eau d'une rivière ou de la mer, soit par de l'eau elle-même refroidie dans des réfrigérants atmosphériques (les tours en forme de diabolos desquelles émanent de grands panaches de vapeur).

L'eau provenant de la condensation de la vapeur est recueillie par des pompes spéciales (d'extraction) qui « gavent » des pompes haute pression (pompes alimentaires) qui elles-mêmes injectent à haute pression l'eau à l'entrée des générateurs de vapeur.

Avant d'être injectée dans les générateurs de vapeur, l'eau est progressivement chauffée de 30°C à 220°C grâce à une série d'échangeurs de chaleur alimentés en énergie par des prélèvements de vapeur ou de condensats effectués à différents étages de la turbine.



les circuits primaires et secondaires (centrales REP 900 MW)

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire

1) Schéma de principe d'une centrale nucléaire à eau pressurisée

1-1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

Une centrale nucléaire (figure 1) comporte deux grandes parties :

a) La chaudière nucléaire.

La chaudière nucléaire (figure 2) est l'ensemble des équipements de production de la vapeur destinée à la partie non nucléaire, dite conventionnelle, de la centrale. Cette vapeur entraîne la turbine du groupe turbine et alternateur générant l'électricité.

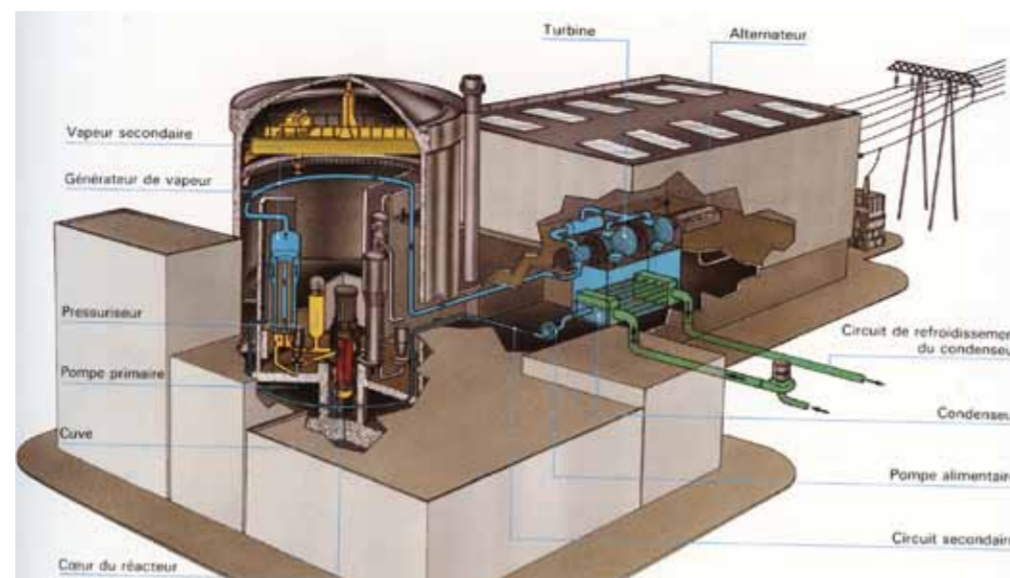
La chaudière nucléaire est entièrement située à l'intérieur d'une enceinte qui la confine, le **bâtiment réacteur**, de forme cylindrique. Elle comprend :

- le **circuit primaire** dont la fonction est d'évacuer l'énergie produite au sein du combustible nucléaire (paragraphe 1-2),
- les systèmes associés de **contrôle commande** et de surveillance nécessaires au fonctionnement normal (paragraphe 2-1),
- les **systèmes de sécurité** destinés à prévenir les situations anormales et les **systèmes de sauvegarde** ayant pour fonction d'assurer la protection et l'intégrité des trois **barrières de confinement de la radioactivité** successivement interposées entre la radioactivité contenue dans le combustible et l'environnement. Ces barrières sont le gainage des éléments combustibles, le circuit primaire et l'enceinte même du bâtiment réacteur (paragraphe 2-2).

b) La partie conventionnelle de production d'électricité.

Cette partie, non nucléaire, est constituée :

- du groupe **turbo-alternateur** composé de la turbine entraînée par la vapeur en provenance de la chaudière nucléaire et de l'alternateur lui-même entraîné en rotation par la turbine. L'**alternateur** est l'organe générant l'électricité.
- du **poste d'eau**. Les fonctions du poste d'eau sont multiples : condenser la vapeur sortant de la turbine à basse pression, réchauffer progressivement l'eau condensée, renvoyer cette eau réchauffée sous pression vers l'entrée des générateurs de vapeur de la chaudière nucléaire.



1 Schéma d'ensemble d'une centrale nucléaire équipée d'un réacteur à eau pressurisée

1-2 LA CHAUDIÈRE NUCLÉAIRE, LES CIRCUITS PRIMAIRES ET SECONDAIRES

2) Schéma de la chaudière d'une centrale à eau pressurisée (REP)

La chaudière nucléaire (figure 2) est essentiellement constituée du circuit primaire dont l'élément principal est la cuve du réacteur à l'intérieur de laquelle sont disposés les éléments combustibles (dont un est figuré en rouge). L'ensemble de ces éléments constitue le cœur du réacteur.

L'énergie dégagée sous forme de chaleur par les fissions qui ont lieu au sein du combustible est évacuée par une intense circulation d'eau. Cette eau, dite primaire (figurée en jaune), circule en circuit fermé (en boucle) entre le réacteur, d'où elle évacue la chaleur, et les générateurs de vapeur où, au travers de milliers de tubes en forme de U renversé, elle cède sa chaleur à l'eau secondaire (en bleu dans le générateur de vapeur) qu'elle vaporise. L'eau primaire est mise en mouvement par les pompes primaires.

La vapeur sortant par le haut du générateur de vapeur est dirigée vers la turbine située à l'extérieur du bâtiment réacteur, dans la partie conventionnelle.

L'eau du circuit primaire et celle du circuit secondaire, sont séparées par la paroi des tubes en U des générateurs de vapeur. L'étanchéité de ces tubes en U est contrôlée en permanence afin d'éviter une éventuelle contamination radioactive de la vapeur arrivant à la turbine située dans la partie non nucléaire de la centrale.



Pour en savoir plus les circuits primaires et secondaires (centrales REP 900 MW)

2) Le fonctionnement et la sûreté des réacteurs nucléaires

2-1 LE DOMAINE DE FONCTIONNEMENT NORMAL ET AUTORISÉ D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

Le domaine de **fonctionnement autorisé** d'une centrale nucléaire est strictement limité. Il est formellement et légalement défini dans le cadre d'un décret autorisant la création et l'exploitation de chaque centrale.

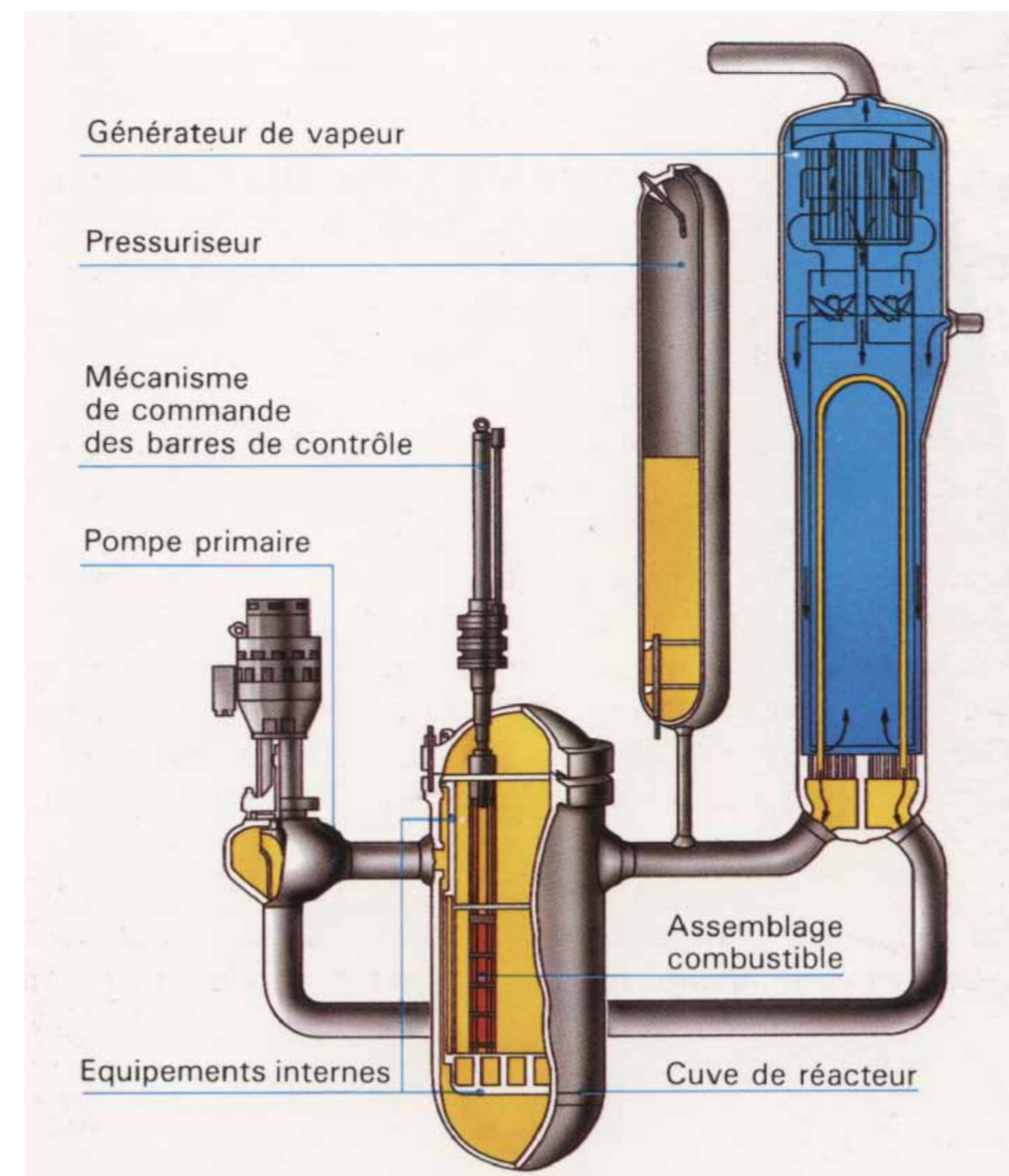
Ce domaine est défini au travers d'un ensemble de grandeurs physiques, de puissance, de température, de pression, de débit, etc... et de paramètres plus spécifiquement liés au nucléaire, en particulier liés à la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants et les rejets radioactifs ou chimiques.

En fonctionnement normal le maintien de la centrale à l'intérieur du domaine de fonctionnement autorisé est assuré par un **système de régulation générale** qui agit automatiquement et anticipe toute dérive, a fortiori toute sortie du domaine autorisé.

En parallèle, un **système de protection** surveille l'ensemble des paramètres représentatifs du fonctionnement et se substitue au système de régulation général en cas de défaillance de celui-ci (ou de défaillance des opérateurs).

Toute sortie du domaine autorisé est signalée par une ou plusieurs alarmes et fait l'objet d'actions correctives automatiques menées sans délai. Généralement les actions du système de protection conduisent d'emblée à l'arrêt automatique de la réaction nucléaire, à l'arrêt du réacteur par chute de l'ensemble des barres de commande.

Les actions de conduite qui ne nécessitent pas d'actions immédiates, peuvent être manuelles et effectuées par les opérateurs, depuis la salle de commande ou localement, conformément à des prescriptions et des consignes préétablies conformément à des « **Règles générales d'exploitation** » approuvées par l'Autorité de sûreté. Ces règles font intégralement partie du Décret ministériel autorisant la création puis l'exploitation de la centrale.



2 Schéma de la chaudière d'une centrale à eau pressurisée (REP)

2-2 LES FONCTIONS DE SÛRETÉ

Trois fonctions essentielles doivent impérativement être **assurées en toutes circonstances**, y compris lors de situations perturbées (incidents) ou accidentelles. Ce sont :

- le **contrôle et la maîtrise de la réaction nucléaire**,
- l'**évacuation de la puissance dégagée par le cœur** du réacteur, y compris la puissance résiduelle dégagée par les produits de fission lorsque le réacteur est à l'arrêt,
- le **confinement des matières radioactives**. Ces matières doivent rester confinées à l'intérieur des enceintes de confinement successives destinées à empêcher la diffusion de la radioactivité vers l'environnement. Ces enceintes de confinement de la radioactivité sont au nombre de trois, successivement, la gaine des crayons de combustible, le circuit primaire et l'enceinte confinant l'ensemble de la chaudière nucléaire (le bâtiment réacteur).

En cas de perturbation ou d'accident, l'action des systèmes de sécurité a pour objectif général de ramener l'installation dans un état sûr et stable et de l'y maintenir en évitant toute dissémination de radioactivité, tant à l'intérieur des installations que dans l'environnement.

Le fonctionnement des **systèmes de sécurité** est commandé par le système de protection qui initie automatiquement leur mise en service et qui contrôle le bon déroulement des différentes phases de leur fonctionnement.



Pour en savoir plus Les systèmes de sécurité des centrales nucléaires

2-3 QUELQUES COMMENTAIRES GÉNÉRAUX SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

2-3-1 Deux principes fondamentaux, parmi d'autres...

- Premier principe : les conséquences d'un accident survenant dans une centrale nucléaire doivent rester circonscrites au site de cette centrale et ne doivent pas entraîner de conséquences dommageables à l'extérieur du périmètre du site.

- Second principe : tous les équipements classés importants pour la sûreté, c'est-à-dire ceux nécessaires à l'arrêt de la réaction nucléaire, à l'évacuation de la puissance résiduelle et au confinement de la radioactivité à l'intérieur des trois barrières de confinement, doivent être conçus, dimensionnés et éprouvés de manière à pouvoir assurer leurs fonctions quelle que soit la situation dans laquelle se trouve la centrale, y compris lors de la survenue des accidents les plus sévères et quelle que soit la défaillance, matérielle ou humaine, ou l'agression interne (incendie...) ou externe (séisme, inondation...) à l'origine de l'accident.

Les systèmes de sécurité sont de deux ordres:

a) Le système « **d'arrêt automatique** » du réacteur : il permet d'arrêter la réaction nucléaire par chute gravitaire de toutes les barres de commande. Ultérieurement, si nécessaire, le maintien du réacteur à l'état sous critique peut être complété et renforcé par des injections d'acide borique provoquant un « empoisonnement neutronique » du cœur (voir ci-après).

L'arrêt automatique est destiné à protéger la chaudière nucléaire et à préserver l'intégrité des deux premières barrières de confinement.

Il agit en premier lieu afin d'éviter la détérioration et la rupture de l'enveloppe des crayons combustibles (**la gaine**) qui constitue la première et la principale barrière de confinement des produits de fission radioactifs.

Il agit également afin de protéger la seconde barrière de confinement, le **circuit primaire** (cuve du réacteur, boucles primaires et générateurs de vapeur) contre les surpressions.

b) **Les systèmes de sauvegarde**. Ils assurent toutes les fonctions de sûreté destinées à rétablir et à maintenir la chaudière nucléaire dans un état sûr et stable. Ces fonctions sont multiples : maintenir le réacteur dans un état sous critique, évacuer en secours la puissance résiduelle, maintenir l'intégrité des trois enceintes de confinement (gaine du combustible, circuit primaire, enceinte du bâtiment réacteur), empêcher ou limiter les éventuels rejets dans l'environnement.

Les différents systèmes de sauvegarde sont :

- Les trois systèmes **d'injection de sécurité**, haute et basse pression et les accumulateurs d'acide borique. Ces systèmes de sauvegarde seraient sollicités au cours de deux types d'accidents : la perte de réfrigérant primaire suite à une rupture de tuyauterie primaire et la rupture d'une tuyauterie vapeur à la sortie des générateurs de vapeur.
- Dans ce dernier cas, l'objectif est d'injecter le plus rapidement possible de l'acide borique très concentré dans le cœur afin de contrebalancer l'effet de son refroidissement rapide qui aurait tendance à favoriser le développement de la réaction nucléaire.

Ces systèmes sont à même d'assurer le refroidissement du combustible sur le long terme par recirculation d'eau.

- Les **systèmes de protection de l'enceinte** du bâtiment réacteur (la troisième barrière de confinement). Suite à un accident qui aurait pour conséquence une augmentation importante de la pression à l'intérieur de cette enceinte, le **circuit d'aspersion de l'enceinte** a pour but de faire baisser cette pression afin de minimiser les fuites éventuelles vers l'environnement et de préserver l'enceinte en y maintenant des températures et des pressions les plus basses possibles.

Suite à l'accident survenu en 1979 à la centrale de Three Mile Island, et au retour d'expérience qui s'en est suivi, les systèmes de protection de l'enceinte ont été améliorés par l'adjonction de « **recombineurs catalytiques** » dont le rôle est d'éviter les explosions dues à la formation et à l'accumulation d'hydrogène à l'intérieur du bâtiment réac-



les systèmes de sécurité des centrales nucléaires

2-3-2 L'amélioration permanente de la sûreté

Malgré la compétence de ceux chargés de la conception, la minutie des études de sûreté, l'attention apportée à la construction et à l'exploitation des centrales nucléaires, l'ampleur de l'expérience acquise à l'échelle mondiale depuis plus d'un demi-siècle et la prise en compte des

l'hydrogène pouvant provenir, en cas d'accident, de la centrale accidentée de Fukushima, soit ont été rapidement hors d'état de fonctionner suite au manque d'électricité pour actionner les vannes d'isolement.

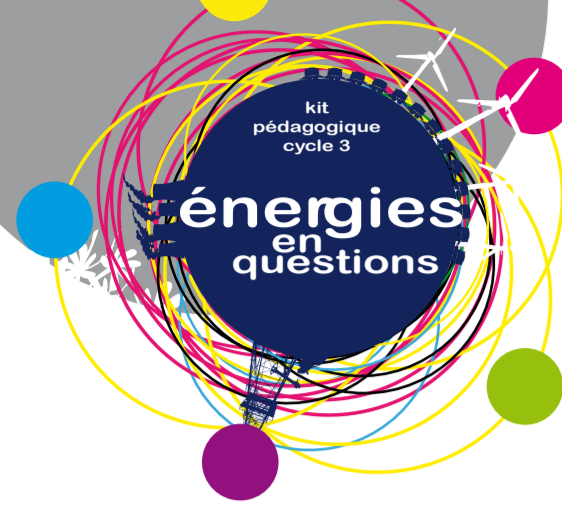
- Le **système d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur**. La défaillance des systèmes assurant l'alimentation en eau des générateurs de vapeur pendant le fonctionnement en puissance entraîne instantanément l'arrêt automatique du réacteur. Le système d'alimentation en secours des générateurs de vapeur a pour fonction d'assurer un débit d'eau suffisant permettant l'évacuation de la puissance résiduelle du cœur du réacteur à l'aide des générateurs de vapeur. Ce système participe à la préservation de l'intégrité de la première barrière de confinement, les gaines des éléments combustibles, en évitant leur échauffement et leur rupture.

Ce système de sauvegarde doit toujours disposer d'au moins une source froide. Pour y parvenir, il doit pouvoir être fait appel à plusieurs sources indépendantes. Selon les sites, diverses sources froides sont simultanément mobilisables (réserves d'eau sur le site même, cours d'eau, lac, puits alimentés par la nappe phréatique, prise d'eau en mer, réfrigérants atmosphériques...)

- **L'alimentation de secours en électricité**. Sans au moins une source d'électricité disponible, l'équipe de conduite d'une centrale perdrait assez rapidement l'usage des systèmes d'information et de contrôle commande ainsi que la majeure partie de ses moyens d'agir et de manœuvrer. Suite au tsunami du 11 mars 2011 ce fut rapidement la situation dans laquelle l'exploitant de la centrale de Fukushima s'est retrouvé, toutes les sources normales et secours internes et externes d'électricité étant rapidement devenues indisponibles.

Toute centrale nucléaire dispose de multiples sources diversifiées et indépendantes d'énergie électrique : au moins deux sources externes d'alimentation électrique, une normale et une de secours, raccordées au réseau général national et de plusieurs alimentations internes. Ces sources internes sont multiples : en premier lieu l'auto-alimentation de la centrale par son groupe turbo-alternateur pouvant, si nécessaire, fonctionner découplé du réseau (fonctionnement en îlotage). La centrale dispose de plus de plusieurs groupes électrogène diesel (au moins un groupe par voie électrique redondante), des batteries alimentant de manière continue les systèmes dits « sans coupure » pour lesquels une interruption d'alimentation électrique, même très brève, n'est pas tolérée. Enfin sur tous les sites il est prévu de pouvoir apporter (par camion ou par hélicoptère) et installer en urgence une ou plusieurs sources électriques supplémentaires (turbine à gaz, groupe électrogène...).

enseignements que l'on en retire, nul ne peut prétendre que tous les événements précurseurs et que tous les scénarios pouvant conduire à une situation accidentelle aient été identifiés, répertoriés, évalués et correctement pris en considération. Ce que le grand public traduit en un mot : « le risque zéro n'existe pas ».



La question de savoir si les dispositions de sûreté déjà prises seront adaptées et efficaces pour faire face à toutes les situations, notamment à celles qui n'auraient pas été envisagées par ignorance, est parfaitement pertinente. Cette question se pose en permanence avec acuité à tout exploitant responsable, à toute autorité de sûreté et aux pouvoirs publics. Comment y répondre de manière pertinente ?

Parmi les voies empruntées pour traquer les événements précurseurs et envisager tous les scénarios et les enchaînements diaboliques pouvant conduire à un accident, la voie la plus féconde consiste à explorer la gigantesque banque de données constituée par la chronique de tous les événements qui se sont produits à travers le monde dans les centrales nucléaires.

Cette exploration doit être conduite jusqu'à l'analyse du plus petit et du plus anodin des événements. Dans certaines circonstances, y compris les plus abracadabrantesques, cet événement anodin aurait peut-être pu devenir le précurseur d'une situation potentiellement dangereuse. Sauf exception, tous les exploitants nucléaires de la planète contribuent à l'alimentation de cette chronique, son analyse et la diffusion des enseignements à en retirer sont assurés par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (l'AIEA) et par de nombreux autres organismes de coopération internationale créés à cet effet.

En France, l'amélioration permanente de la sûreté repose pour une part très importante sur l'analyse des événements passés ainsi collectés et sur l'expérience acquise lors de l'exploitation des centrales à travers le monde. Cette expérience est considérable puisqu'elle porte sur plus de 400 centrales en fonctionnement à travers le monde, cumulant à ce jour largement plus de 10 000 années de fonctionnement.

Les exploitants, les constructeurs, l'Autorité de sûreté française (l'ASN) et son support scientifique l'IRSN collectent en permanence tous ces enseignements dès lors qu'ils concernent un événement qui a eu, ou qui aurait pu, avoir un impact sur la sûreté. Leur analyse est à la base d'une évaluation permanente et critique du niveau de la sûreté des installations, cette analyse concerne tout autant la conception que les procédures de conduite, de maintenance ou de formation et d'entraînement des personnels. L'évaluation peut, si nécessaire, se traduire par des modifications apportées soit aux installations soit aux procédures.

En France, la standardisation du parc de production nucléaire facilite une réalisation de ces modifications généralisée à l'ensemble des centrales. La plupart des modifications sont effectuées simultanément sur toutes les centrales, indépendamment de leur âge, ce qui assure une mise à niveau homogène de la sûreté de l'ensemble de ce parc de production.

3) Les réacteurs de quatrième génération

3-1 LA VALORISATION DES RESSOURCES NATURELLES

Sous l'appellation de « **réacteurs de quatrième génération** » on distingue plusieurs types de réacteurs appartenant à des filières notablement différentes des principales filières ac-

tuellement en exploitation, celles des réacteurs électrogènes à uranium légèrement enrichi pressurisés (REP) ou bouillants (BWR).

Le premier objectif recherché par ces nouvelles filières est de mieux valoriser les ressources naturelles de matières fissiles ou potentiellement fissiles.

Les **ressources naturelles de matières fissiles** se réduisent au seul uranium 235 qui n'est présent qu'à hauteur de 0,7% dans l'uranium naturel.

Les « **ressources de matières potentiellement fissiles** » sont l'uranium 238 (qui constitue 99,3 % de l'uranium naturel) et le thorium 232 présent en abondance dans l'écorce terrestre. Ces ressources potentiellement fissiles sont beaucoup plus importantes que la seule ressource en uranium 235, actuellement la seule exploitée.

Comme évoqué précédemment (chapitre la réaction de fission, paragraphes 2-2 et 2-4), lorsqu'un élément naturel non fissile, l'uranium 238 ou le thorium 232, est soumis à un flux de neutrons il est possible, par capture de ces neutrons, de générer un nouvel élément fissile, soit, respectivement, le plutonium 239 et l'uranium 233.

C'est ce qu'on cherche à produire dans les réacteurs de quatrième génération où, indépendamment mais simultanément à la production d'énergie, on soumet des « **éléments fertiles** », essentiellement composés d'uranium 238 ou de thorium 232, à un flux intense de neutrons pour générer une matière fissile, plutonium 239 ou thorium 233.

Le fonctionnement des réacteurs actuels ayant déjà produit de grandes quantités de plutonium (à raison d'une trentaine de kilogrammes par milliards de kWh), l'objectif actuellement recherché est plutôt d'utiliser les réacteurs de quatrième génération pour gérer (présentement réduire) le stock de plutonium existant... en particulier réduire le stock des armes nucléaires dont les grandes puissances doivent se débarrasser conformément aux accords qu'elles ont signés sur leur désarmement mutuel. Depuis longtemps les Russes utilisent les matériaux fissiles de leurs vieilles armes à détruire à des fins de production d'énergie.

Nous ne décrivons ici que les réacteurs de quatrième génération de la filière à neutrons rapides refroidis au sodium, une filière pour laquelle l'expérience passée est la plus importante.

3-2 LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

Dans les réacteurs à neutrons dits « **rapides** », la réaction en chaîne est entretenue par un flux de neutrons prompts directement issus des fissions, sans qu'au préalable ils soient ralentis et amenés à l'état thermique avant leur capture par un noyau fissile.

D'où le nom générique de « rapides » donné à ce type de réacteurs.

Cette particularité ne signifie nullement que les « **réacteurs rapides** » soient plus « nerveux » ou plus « indomptables » que les réacteurs fonctionnant avec des neutrons « modérés » ou « thermiques plus lents » !

Pour imager la différence entre les deux types de réacteurs, dans les réacteurs à neutrons thermiques (voir l'illustration des figures 4 et 5 du

chapitre La réaction de fission) on pratique le « billard à 40 bandes », une quarantaine de collisions étant nécessaires à leur ralentissement avant leur capture, dans les réacteurs rapides on pratique un « billard direct » sans utiliser les bandes, les neutrons étant absorbés pratiquement tels qu'ils ont été émis lors de la fission qui les a générés.

Dans les deux types de réacteurs le contrôle de la réaction en chaîne repose exactement sur le même principe : il repose sur l'émission des neutrons retardés (voir le pour en savoir plus sur le contrôle de la réaction en chaîne du chapitre la réaction de fission) et sur les mêmes phénomènes de contre-réaction auto-stabilisants (effet Doppler de température et de puissance).

La principale différence entre les deux types de réacteurs réside dans l'enrichissement du combustible. Dans les réacteurs à neutrons rapides, la probabilité de fission d'un noyau d'uranium ou de plutonium par un neutron rapide est plus faible que la probabilité de fission provoquée par un neutron thermique dans un réacteur avec modérateur. C'est la raison pour laquelle, afin d'augmenter la probabilité de fission, il est nécessaire de disposer dans les réacteurs rapides d'un combustible plus riche en matière fissile que ne l'est le combustible des réacteurs à neutrons thermiques.

La teneur en matière fissile du combustible d'un réacteur rapide de grande taille est de l'ordre de 15 % à 18% contre 3 à 3,5% pour le combustible des réacteurs avec modérateur.

La nécessité d'enrichir le combustible des réacteurs à neutrons rapides implique que la puissance dégagée dans un volume donné du cœur (la « puissance volumique ») est plus importante dans les réacteurs rapides que dans les réacteurs à neutrons thermiques. Cette spécificité contraint de choisir un fluide de refroidissement, un « **fluide caloporteur** », capable d'évacuer une forte puissance dans un petit volume.

Autres contraintes, et non des moindres, le fluide doit être « transparent » aux neutrons, (ne pas les absorber) et ne pas s'activer (devenir radioactif) sous l'effet de leur bombardement.

En additionnant l'ensemble des contraintes, le choix du fluide caloporteur se circonscrit rapidement à un petit nombre de possibilités : soit un métal fondu, à la condition qu'il soit à l'état liquide à basse température (le sodium, éventuellement le plomb...), soit un gaz sous forte pression (hélium, gaz carbonique).

Généralement le sodium a été retenu comme fluide caloporteur pour les réacteurs rapides construits jusqu'à ce jour (USA, Royaume Uni, Russie, Inde, Chine, Japon et France).

D'autres filières sont possibles. L'une d'elles, assez avant-gardiste, envisage l'utilisation de sels fondus. Le combustible (à base d'uranium 233 obtenu à partir du thorium 232) et le fluide caloporteur sont intimement mélangés sous forme de sels, ces sels étant liquides à la température de fonctionnement du réacteur.

3-3 LES SURGÉNÉRATEURS.

Ce sont des réacteurs rapides ayant la capacité de produire de l'énergie et, simultanément, de produire plus de matière fissile qu'ils n'en consomment en convertissant l'uranium 238

non fissile en plutonium 239 fissile par capture d'un neutron (ou le thorium 232 en thorium 233). Il ne s'agit nullement d'un rêve d'alchimiste mais d'une réalité comme l'a montré le fonctionnement des prototypes construits à travers le monde. En France cette démonstration a été administrée par le fonctionnement des prototypes de réacteurs rapides surgénérateurs Rapsodie à Cadarache et Phénix à Marcoule.

4 Pour en savoir plus La surgénération



3 Absorption d'un neutron par l'uranium 238 et formation de plutonium 239

La chaîne de réactions conduisant à la production de plutonium 239 se déroule dans tous les réacteurs nucléaires dès lors que leur combustible contient de l'uranium 238. La différence entre les surgénérateurs et les réacteurs nucléaires classiques réside dans les bilans des matières, celui des matières fissiles consommées et celui des matières fissiles produites au cours de leur fonctionnement :

- dans les réacteurs classiques à neutrons thermiques, lors de leur fonctionnement, la consommation de matière fissile (U 235) est supérieure à la quantité de matière fissile produite (Pu 239). Pour ces réacteurs, le bilan présenté au paragraphe 2-4 du chapitre La réaction de fission montre que la production d'un térawattheure électrique s'accompagne de la consommation de 96 kg d'uranium 235 et de la production de 26,7 kg de plutonium fissile. La consommation de matière fissile est donc supérieure à la production de matière fissile

- dans les **surgénérateurs** l'ensemble du cœur du réacteur est conçu de manière à optimiser la production de plutonium. En clair, lors de leur fonctionnement, tout en produisant de l'énergie, les réacteurs rapides produisent une quantité de plutonium fissile supérieure à la quantité de matière fissile consommée (uranium 235 ou plutonium 239) pour la production d'énergie. Pour 1 kg de matière fissile « investi », introduit dans le réacteur lors du chargement du combustible, outre l'énergie produite, au déchargement, on récupère un peu moins de 1,2 kg de matière fissile nouvelle, soit un surplus de matière fissile de l'ordre de 20 % par rapport à la quantité de matière fissile initialement chargée.

3-4 L'INTÉRÊT DE LA SURGÉNÉRATION

L'intérêt de la surgénération est évident puisqu'il devient possible de transformer une matière non fissile, uranium 238 constituant 99,3 % de l'uranium naturel, en matière fissile.

Par rapport aux réacteurs à neutrons thermiques, qui n'utilisent que l'uranium 235 (7 grammes de matière fissile par kilogramme d'uranium naturel), grâce à la surgénération on pourrait parve-

nir - en théorie - à transformer les 993 grammes d'uranium 238 contenus dans un kilo d'uranium naturel en plutonium fissile.

On multiplierait ainsi par 140 l'énergie qu'il est possible d'obtenir à partir d'une même quantité d'uranium naturel extraite du sol...

En pratique, pour diverses raisons, le gain obtenu par la surgénération ne peut pas être aussi élevé que ce gain théorique de 140. Raisonnablement il serait de l'ordre de 10 ou de 20, c'est-à-dire que des réserves exploitables d'uranium qui sévaluent aujourd'hui à l'échelle du siècle, sévaluent à l'échelle du millénaire, ou plus.

4 Schéma de principe d'une centrale surgénératrice

La figure 4 illustre le principe du fonctionnement des surgénérateurs.

Le cœur d'un réacteur rapide fonctionnant en surgénérateur est composé de deux zones : - en son centre (en rouge) les éléments combustibles fissiles constitués d'un mélange d'uranium 235 (ou de plutonium 239) et d'uranium 238 - en périphérie d'une enveloppe appelée « **couverture fertile** » (en jaune) qui, initialement, ne contient que de l'uranium 238 non fissile.

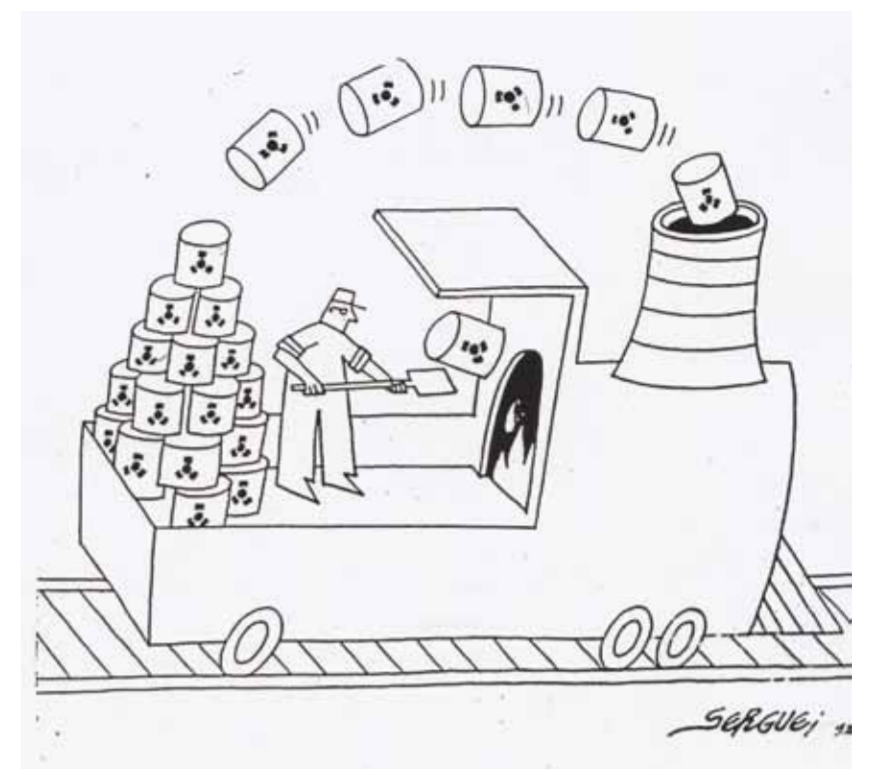
Lors du fonctionnement du réacteur en puissance, l'uranium 238 du cœur et de la couverture fertile est soumis au flux des neutrons et se transforme progressivement en plutonium 239. Dans le même temps, le cœur par lui-même s'appauvrit en matière fissile tandis que la couverture fertile s'enrichit en plutonium 239, la quantité de matière fissile générée au sein de la couverture fertile étant cependant supérieure à celle consommée dans le cœur.

Enfin, et globalement entre le cœur et la couverture fertile, le gain obtenu est de l'ordre de 17% par cycle de chargement-déchargement. Le principe d'un surgénérateur utilisant le thorium 232 comme élément fertile serait le même. Le thorium 232 non fissile étant transformé par capture d'un neutron en uranium 233 fissile.

Bilan annuel du fonctionnement du surgénérateur de 1240 MW (Creys Malville)

- puissance du réacteur 3 000 MW thermique :
- fonctionnement 6600 heures / an
- production annuelle : 8 milliards de kWh
- matière consommée, chargée en début de cycle : 800 kg de matière fissile
- matière générée pendant le fonctionnement : 960 kg de plutonium (dont 640 dans le cœur et 320 dans la couverture fertile)
- production nette de matière fissile : 960 au déchargement moins 800 au chargement, soit 160 kg
- taux de surgénération : 160 / 960 soit 17%.

4 Bilan annuel du fonctionnement du surgénérateur de 1240 MW (Creys Malville)



5 La surgénération vue par Sergueï

4 La surgénération

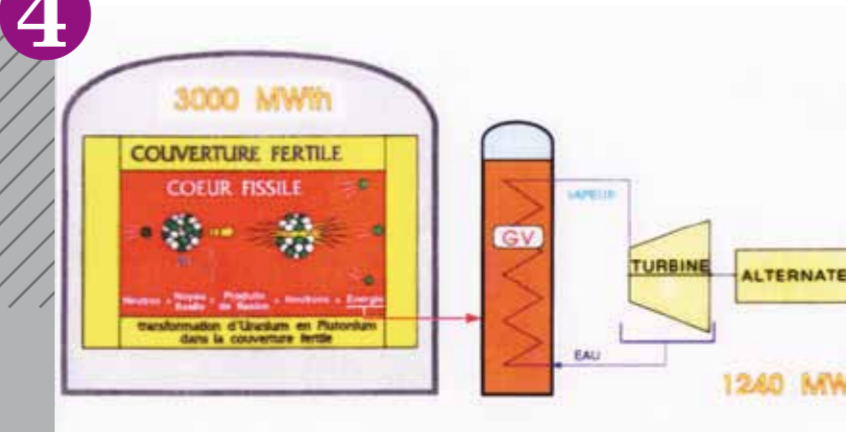
La surgénération ne procède d'aucun miracle et ne recèle aucun mystère, elle n'est fondée que sur des phénomènes relevant de la physique. Son principe repose exclusivement sur une chaîne de réactions nucléaires conduisant à la formation de plutonium 239 fissile par capture d'un neutron par un noyau d'uranium 238 non fissile.

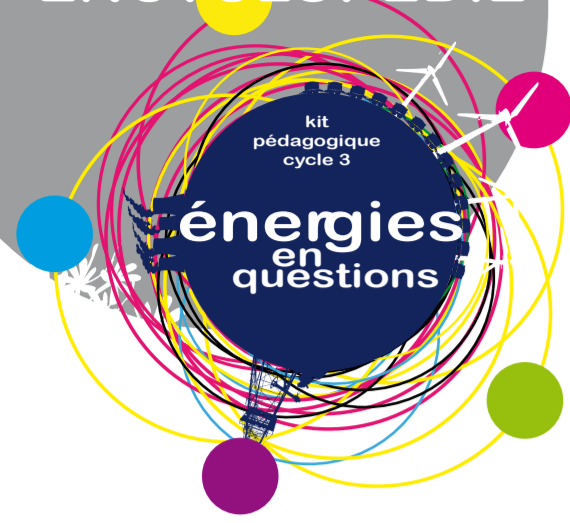
Il existe une seconde filière de surgénération, celle du thorium. Dans cette filière, la surgénération consiste, toujours par capture neutronique, à produire du thorium 233 fissile à partir du thorium 232 non fissile.

Selon le schéma de la figure 12, le neutron capturé par un noyau d'uranium 238 donne dans un premier temps naissance à un noyau d'uranium 239 qui, par désintégration β^- (période 23 minutes), se transforme en neptunium 239 aboutissant finalement au plutonium 239 fissile par une nouvelle désintégration β^- de période 2,4 jours :

	capture d'un neutron	1ère désintégration β^- (23 min)	2ème désintégration β^- (2,4 j)	
neutron + U 238 non fissile =>	U239 =>	neptunium 239 =>	plutonium 239 fissile	
	92 protons 146 neutrons	92 protons 147 neutrons	93 protons 146 neutrons	94 protons 145 neutrons

4 Schéma de principe d'une centrale surgénératrice





Les déchets nucléaires

1) Matières recyclables et déchets ultimes

Pour les déchets industriels et ménagers, le tri sélectif permet d'identifier et de séparer différents types de déchets en vue d'une éventuelle valorisation. On distingue diverses catégories de déchets : les **déchets valorisables** (végétaux, verre, cartons, ferraille...) et les **déchets ultimes**, non valorisables, qui doivent être stockés définitivement sous contrôle dans des décharges spécifiques.

Il devrait en être de même pour ce que le grand public appelle sans distinction les « **déchets nucléaires** ». Tout comme pour les autres déchets, il convient de distinguer les déchets ultimes pour lesquels il n'y a pas à ce jour d'utilisation connue ou notoire et les déchets valorisables... pour peu qu'on veuille les considérer ainsi et se donner les moyens de les séparer, de les trier afin de les valoriser.

Font partie de cette catégorie des « déchets valorisables » tous les isotopes, fissile ou non, de l'uranium et des transuraniens (neptunium, plutonium, américium, curium) issus du cycle du combustible.

Leur valorisation nécessite de les séparer des produits de fission, qui sont des déchets ultimes non valorisables, puis de les utiliser comme combustible :

- le plutonium fissile est mélangés à de l'uranium enrichi pour fabriquer le combustible MOX (M pour « mélange » et OX pour oxyde) pour les réacteurs à neutrons thermiques,
- le plutonium et les transuraniens, qu'ils soient fissiles ou non, sont mélangés à l'uranium ou au plutonium dans les réacteurs rapides. Ces réacteurs sont capables de tous les « transmuter », c'est-à-dire de les rendre fissiles, puis de les « **incinérer** » en provoquant leur fission (voir paragraphe 3-3).

Dans le bilan des produits résultant directement de la fission (chapitre 2-4 La réaction de fission) il convient de distinguer :

a) Les produits de fission à vie courte, moyenne ou longue.

Ce sont les « cendres ultimes » du nucléaire, non valorisables. Ils représentent 3 à 4 % de la masse du combustible chargé en réacteur. Ils sont radioactifs, ils émettent des rayonnements β - et γ . La plupart ont des périodes comprises entre une fraction de seconde et 30 ans. Seulement 7% d'entre eux (soit 9 kg par milliard de kWh produit) ont des périodes supérieures à 30 ans.

b) Les actinides

Ce sont les uraniums, les plutoniums et les actinides dits mineurs (neptunium, américium et curium). Les plutoniums représentent 1% de la masse initiale de la matière fissile chargée dans un réacteur (38 kg par milliard de kWh), les actinides mineurs moins de 0,1% de cette masse initiale.

Les isotopes de ces actinides, qu'ils soient ou non fissiles, sont tous valorisables sous certaines conditions. Ils peuvent être recyclés et servir à la fabrication d'éléments combustibles à charger dans les réacteurs à neutrons lents ou à neutrons rapides selon les cas.

La plupart des actinides sont des émetteurs α (émission d'un noyau d'hélium) leur désintégration s'accompagnant d'un rayonnement γ . Les périodes radioactives des actinides sont très diverses, de quelques minutes à plusieurs milliers d'années.

Leur radiotoxicité (leur effet sanitaire) est traitée ci-après au chapitre 3-1.

c) Les déchets non liés au cycle du combustible

Aux déchets résultant directement de la fission du combustible, que l'on retrouve dans le combustible usagé, il convient d'ajouter :

- les déchets résultant du **cycle de fabrication du combustible** et de l'**exploitation des installations** (traitement des effluents liquides et solides, outillages, vêtements, ...).

- **les produits d'activation**. Ils ne sont pas directement liés au combustible mais résultent de l'activation des matériaux des structure des réacteurs (éléments du circuit primaire, absorbants des barres de commande...) sous l'effet du bombardement neutronique. On retrouve ces produits d'activation dans les matériaux issus du démantèlement de la partie nucléaire des centrales.

2) Classification des déchets nucléaires

La classification actuelle est établie selon un double critère :

- selon l'**activité** du déchet : faible (FA), moyenne (MA) ou haute (HA)
- selon la **durée de vie** ou **période radioactive** du déchet : vie courte (VC) si la période est inférieure à 30 ans, vie longue (VL) si elle est supérieure à 30 ans. A cette classification il convient d'ajouter une catégorie à part, les déchets de très faible activité (TFA).

Les TFA sont des matériaux provenant essentiellement de la déconstruction des centrales (béton, gravats, ferraille...). Leur activité est très faible et décroît en quelques dizaines d'années à un niveau moyen de l'ordre de 1000 becquerels par kilogramme soit l'équivalent de l'activité d'une bordure de trottoir en granite (celle-ci dépassant couramment une activité de 1000 Bq/kg).

1 Classification des déchets radioactifs en fonction de leur activité et de leur durée de vie

Pour différentes catégories de déchets, la figure 1 indique leur proportion en volume et en activité selon leur durée de vie (courte VC ou longue VL) et selon leur activité (TFA, FA, MA, HA) et donne également une prévision de leur volume cumulé d'ici 2020.

- Les déchets FMA-VC, de faible ou moyenne activité et à vie courte. Ils représentent plus des trois quarts du volume des déchets et ont une période inférieure à 30 ans. Ce sont des déchets de fabrication, des équipements et des matériaux usagés en provenance du nucléaire civil (de l'exploitation des réacteurs nucléaires et des centres de retraitement du combustible), des centres de recherche, des centres de la Défense nationale, des laboratoires, des hôpitaux, de l'industrie... Ils sont stockés au centre de Soulaïnes dans l'Aube. Leur activité n'est plus significative au bout de 10 périodes, soit 300 ans.

- Les déchets FA-VL de faible activité à vie longue. Ce sont essentiellement les déchets minéraux contenant du radium (radifères) issus du traitement du minerai d'uranium ou des « terres rares », du démontage ou de la récupération d'objet contenant du radium.

- les déchets MA-VL, moyenne activité à vie longue. Ils représentent moins de 5% du volume des déchets. Ce sont des déchets de procédés provenant du combustible irradié (coques et embouts de gaine), du traitement des effluents solides et liquides (filtres, résines) ou de la maintenance des installations (déchets activés).

- Les déchets HA-VL à haute activité et à vie longue. Ils sont issus du retraitement des combustibles et concentrent à eux seuls 96% de la radioactivité totale des déchets bien qu'ils ne représentent que 0,2% du volume total de ces déchets. Ils sont conditionnés, vitrifiés dans une matrice inerte de verre coulée dans des containers en acier. Ils sont entreposés dans des installations nucléaires spécifiques (Marcoule, Cadarache, La Hague) dans l'attente d'un stockage définitif qui fait actuellement l'objet de recherche et d'expérimentations conformément aux dispositions des lois du 30 décembre 1991 et du 28 juin 2006.

+ La classification des déchets nucléaires

+ Pour en savoir plus La radiotoxicité

3) Les actinides : séparation, transmutation, stockage

3-1 LA RADIOTOXICITÉ DES ACTINIDES MINEURS

Le plutonium et les actinides mineurs (neptunium, américium et curium) sont pour la plupart des émetteurs α à longue durée de vie. Ils sont classés HA-VL.

La radiotoxicité est une notion utilisée pour évaluer la nuisance potentielle d'un élément radioactif en fonction du temps, c'est une grandeur théorique obtenue par calcul.

Pour un instant « t », situé dans le futur, elle indique pour un élément radioactif l'effet radiologique (l'effet sanitaire) que l'ingestion d'un gramme de cet élément aurait sur une personne. Plus exactement elle indique, pour un instant temps « t », l'effet de ce qui subsistera de cet élément radioactif et du cumul des effets de ses descendants « fils », « petits-fils »... eux-mêmes radioactifs.

La notion de radiotoxicité est très difficile à appréhender du fait de la complexité et de la longueur des chaînes de désintégrations successives qui aboutissent finalement à un élément stable non radioactif.

Chaque radioélément initial, le « père », se désintègre et disparaît progressivement en donnant naissance à un élément, le « fils ». Si le « fils » est radioactif, il va à son tour se désintégrer et donner un nouvel élément le « petit-fils ». Si le petit fils est lui-même radioactif, il se désintégrera en donnant un arrière-petit-fils qui lui-même... et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on aboutisse à un descendant stable. Pour les actinides émetteurs alpha, la chaîne de désintégration s'arrêtera à un isotope stable du plomb.

A partir d'un « père » une chaîne de désintégration aboutissant au plomb peut comporter jusqu'à 15 étapes de désintégration successives ! La complexité provient du fait que, dans un déchet, chaque génération, depuis le « père » puis le fils, le petit-fils... est présente et participe à la radiotoxicité globale du déchet.

L'activité de la génération initiale, celle des « pères », ne peut aller qu'en décroissant, la radiotoxicité de cette génération décroît. Par contre l'activité des « fils » va croissant, tout au moins dans un premier temps tant qu'il subsiste suffisamment de « pères » pour engendrer des fils. La radiotoxicité de la génération des « fils » va donc aller en croissant avant de décliner à son tour lorsque la génération des « pères » s'amenuisant de plus en plus créera moins de fils qu'il n'en disparaît par désintégration radioactive. Le même raisonnement montre que la radiotoxicité de chaque génération ultérieure, petits-fils, arrière petits fils... va dans un premier temps en croissant avant de décroître et de disparaître.

Le calcul permet de déterminer, en fonction du temps, la radiotoxicité de chaque génération et la radiotoxicité globale d'un déchet.

+ La radiotoxicité

Temps en années	100	10 000	100 000	10 ⁶
Radiotoxicité totale (Sv/g)	3,1x10 ⁸	7,7x10 ⁷	4,2x10 ⁶	5,2x10 ⁵

Temps en années	100	10 000	100 000	10 ⁶
Uranium de retraitement			6 %	28 %
Total Plutonium	90 %	97 %	88 %	50 %
Total Neptunium			1,3 %	13 %
Total Américium	9,2 %	2,5 %	2,7 %	6,8 %
Total Curium	0,3 %	0,4%		
Total produits de fission	0,006%	0,2%	2 %	2 %

2 Participation (calculée en pourcentage) des divers éléments à la radiotoxicité totale

Le tableau suivant résulte d'un tel calcul. Il indique en fonction du temps la participation en % des divers éléments radioactifs à vie longue : uranium appauvri issu du retraitement, Pu, Np, Am, Cm et de l'ensemble des produits de fission à vie longue résultant du cycle du combustible. La radiotoxicité totale des déchets engendrés par la production de un térawattheure électrique est ici exprimée en sievert par gramme.

2 Participation des divers éléments à la radiotoxicité globale

En résumé, la lecture des tableaux ci-dessous montre que sur le moyen et le long terme :

- la radiotoxicité de l'ensemble des produits de fission est prépondérante lors du fonctionnement des réacteurs, le tableau montre cependant qu'elle devient rapidement non significative au-delà de trois siècles. A 1 000 ans elle ne représente en effet plus que les 0,06 % de la radiotoxicité totale,
- la radiotoxicité à long terme est essentiellement due aux actinides, aux plutoniums (90% au bout de 1 000 ans) et, dans une moindre, mesure aux américiums. A très long terme (le million d'année) c'est l'activité naturelle de l'uranium appauvri issu du retraitement des combustibles qui deviendra prépondérante.

En un million d'années la radiotoxicité totale a été divisée par un facteur 1 000.

Ces deux constats ci-dessous constituent la base des choix stratégiques qu'il serait souhaitable de retenir en matière de gestion des actinides (plutonium, neptunium, américium...)

Chaque génération de la chaîne de désintégration apparaît puis disparaît en donnant naissance à la génération suivante.

La radiotoxicité d'un élément s'exprime en **Sievert par gramme absorbé (Sv/g)**, le sievert étant « l'équivalent de dose » qui traduit les effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'organisme.

3-2 LA GESTION DES ACTINIDES

Toute la stratégie de gestion sur le long terme des actinides dépend étroitement de la stratégie générale adoptée quant à l'utilisation (ou à la non utilisation) et à la valorisation de ces actinides, en premier lieu de la stratégie adoptée concernant les plutoniums.

Les deux grandes stratégies possibles sont :

- le **non retraitement** du combustible, aucune valorisation, aucun recyclage du Pu,
- le **retraitement** avec recyclage du plutonium dans un combustible constitué d'un mélange d'oxyde d'uranium (235 et 238) et de plutonium.

Ce combustible mixte, appelé **MOX**, est actuellement utilisé dans certaines centrales. Ce recyclage est cependant limité par un phénomène « d'empoisonnement » progressif du plutonium par ses isotopes pairs qui ne sont pas fissiles. Notons que cet empoisonnement rend le plutonium des réacteurs électrogènes (REP) impropre à tout usage militaire.

Si l'option du retraitement du combustible est retenue, l'option dite de **la séparation et de la transmutation** devient possible. Cette option préconisant la séparation des éléments issus du cycle du combustible puis leur valorisation par transmutation est l'option décrite par la loi sur la gestion des produits résultant de l'aval du cycle combustible, dite Loi Bataille, adoptée à l'unanimité par le Parlement fin 1991.

3-3 LA SÉPARATION ET LA TRANSMUTATION

Avant même d'aborder le stockage définitif en formation géologique profonde qui constituait le troisième volet de la loi de 1991, le premier volet de la loi demandait à ce que deux objectifs complémentaires soient poursuivis à savoir : La **séparation** des différents éléments résultant du cycle combustible en distinguant les éléments non valorisables, les déchets ultimes, et ceux valorisables dont les actinides qu'il est possible d'utiliser en tant que combustible nucléaire. Parmi les actinides obtenus après séparation, certains sont fissiles d'autres ne le sont pas. Tous ne sont donc pas directement réutilisables, d'où le second objectif de ce premier volet de la loi : la **transmutation**.

La transmutation a pour but de rendre fissiles les actinides qui ne le sont pas. On atteint cet objectif en soumettant ces actinides à un flux de neutrons fourni par un réacteur en fonctionnement. Ils sont progressivement transmutés en éléments fissiles par capture d'un ou de plusieurs neutrons et peuvent finalement être valorisés au même titre que les actinides fissiles puis être intégrés dans un combustible nucléaire et de la sorte « incinérés » par fission nucléaire.

La séparation puis la transmutation par capture neutronique, et finalement « l'incinération » par fission nucléaire, présentent le double avantage de transformer les actinides fissiles, ou non, issus du cycle combustible et classés HAVL (haute activité vie longue) en produits de fission à vie courte tout en produisant de l'énergie.

3 Utilisation des réacteurs à neutrons rapides : la transmutation des déchets HAVL d'après Sergeï

3-4 LE RÔLE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES DANS LA TRANSMUTATION

La transmutation suivie de « l'incinération » par fission ne peut être réalisée avec un rendement acceptable que si les actinides, notamment ceux initialement non fissiles et très « neutrophages », sont soumis à un flux intense de neutrons rapides. La transmutation n'est de ce fait réalisable que dans des réacteurs à neutrons rapides. Elle le serait également en théorie dans des réacteurs dits « **hybrides** » munis d'un accélérateur. Ce dernier type de réacteur, dont l'idée émane de Carlo Rubbia (prix Nobel de physique et ex-directeur du CERN), n'existe actuellement que sous forme de projet.

En France les programmes de recherche concernant la séparation ont été menés à Marcoule dans l'installation Atalante et ceux concernant la transmutation l'ont été à Phénix.

La recherche à l'échelle pré industrielle sur la transmutation n'a pas pu être entreprise comme prévue dans le surgénérateur de Creys Malville suite à la décision prise en 1997 d'arrêter définitivement cette installation.

Les autres volets de la loi de 1991, repris par la loi de 2006, concernent le stockage réversible ou irréversible des déchets à haute activité et à vie longue dans des formations géologiques profondes ainsi que les procédés de conditionnement et d'entreposage en surface des autres types de déchets.

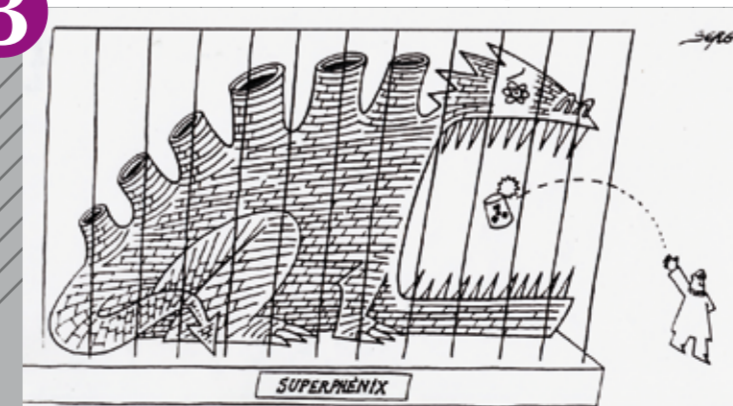
Concernant le volet sur le stockage en formation géologique profonde, les recherches et les expérimentations sont actuellement en cours au Laboratoire de recherche souterrain de Bure aux confins de la Meuse et de la Haute Marne.

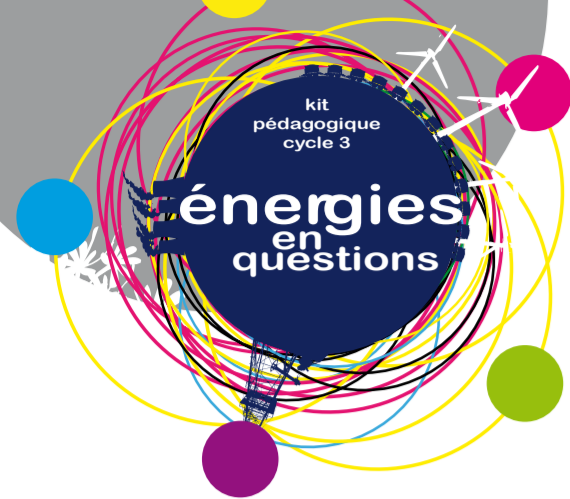
1 Classification des déchets radioactifs en fonction de leur activité et de leur durée de vie

Nature	Volume (en 2002)	Pourcentage du volume	Pourcentage de l'activité	Volume (prévision 2020)
TFA	108 219 m ³	11,1 %	Négligeable	516 000 m ³
FMA-VC	778 322 m ³	79,6 %	0,07 %	1 197 000 m ³
FA-VL	44 559 m ³	4,5 %	0,01 %	87 500 m ³
MA-VL	45 359 m ³	4,6 %	3,97 %	55 000 m ³
HA-VL	1 639 m ³	0,2 %	96,05 %	3 600 m ³

Source : ANDRA

3 Utilisation des réacteurs à neutrons rapides : la transmutation des déchets HAVL d'après Sergeï





Les réserves en uranium naturel et en thorium

1) Le long voyage de l'uranium depuis le centre de la terre

Pour expliquer la genèse (fort complexe !) des gisements d'uranium il est nécessaire d'avoir recours à quelques notions de géologie. Cette genèse a pour décor les profondeurs du globe terrestre et pour moteur les mouvements qui animent ces profondeurs.

a) La structure du globe terrestre. Elle comporte plusieurs zones :

Au centre, la zone la plus profonde, entre moins 3 378 (le centre de la Terre) et moins 2 900 km, est formée de la « **graine** » solide et du « **noyau** » liquide qui l'entoure.

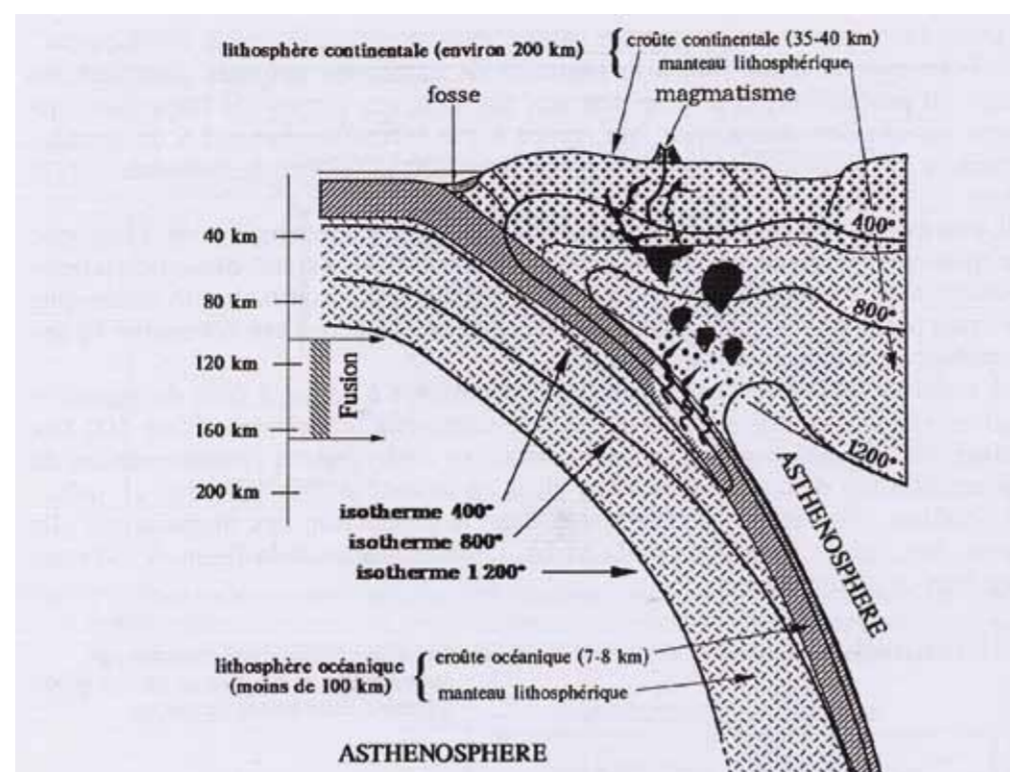
De - 2900 à - 150 km se situe le « **manteau** ». Successivement le « **manteau inférieur** », solide et, de - 700 à environ - 150 km, le « **manteau supérieur** » ou « **asthénosphère** » plus ou moins plastique et déformable.

L'ensemble du manteau est animé de mouvements de convection ayant pour origine et pour moteur la chaleur, celle initiale accumulée pendant la formation de la planète (la chaleur d'accrétion) et la chaleur dégagée en permanence par la désintégration radioactive des radioéléments naturels que renferme le manteau, l'uranium et ses descendants.

La dernière zone, la plus externe sur laquelle nous vivons, la « **lithosphère** » (du grec litho signifiant pierre et sphère évoquant sa forme) est une couche rigide d'épaisseur variable, d'environ 70 km sous les océans, elle peut atteindre 150 km sous les continents.

Cette couche rigide et cassante est découpée en plaques. Les plaques les plus vastes forment les grands continents, l'Eurasie, l'Afrique, les Amériques du Nord et du Sud... d'autres plaques sont plus petites, plaques Arabique, Nazca, Cocos... Les plaques sont entraînées par les mouvements lents du manteau supérieur plastique et déformable sur lequel elle « flottent ». La vitesse des déplacements de quelques centimètres par an est variable selon les plaques.

b) La tectonique des plaques. Le déplacement des plaques fait l'objet d'une théorie relativement récente, la « **tectonique des plaques** », que les observations par satellite confirment et affinent chaque jour. Soit les plaques s'écartent en séparant des continents et en ouvrant des océans (exemple l'ouverture des Atlantiques Sud et Nord), soit elles se télescopent pour former des chaînes de montagnes (Alpes, Himalaya...), soit encore elles se chevauchent. Dans ce dernier type de mouvement, appelé « **subduction** », la plaque dont les matériaux sont les plus denses s'enfonce sous l'autre. C'est le mécanisme de subduction qui permet d'expliquer la genèse des filons et des gisements riches en uranium.



Après une fusion partielle qui débute à partir d'une profondeur d'une centaine de kilomètres, la partie fondue de la croûte océanique tend à remonter vers la surface à travers la croûte continentale (remontées figurées sur le schéma par les poches noires). Soit elle alimente un volcanisme en surface, soit elle reste prisonnière sous la croûte continentale et forme, après refroidissement, des massifs appelés plutons ou batholites.

1 Schéma de la subduction de la croûte océanique sous la croûte continentale

Si les mouvements des plaques sont « lents », de quelques centimètres par an (la vitesse de la pousse d'un ongle !) jusqu'à 10 et même 15 cm (soit celle de la pousse des cheveux), sur des millions d'années ils finissent par engendrer des déplacements de plaques de plusieurs milliers de kilomètres. Ainsi s'est créé l'Océan Atlantique séparant l'Afrique et l'Europe des Amériques et se sont érigées les chaînes de montagnes, l'Himalaya étant par exemple le résultat du télescopage de l'Asie et de l'Inde... etc.

Ce sont également ces mouvements qui engendrent les séismes. Les limites à partir desquelles les plaques s'écartent sont généralement situées au milieu et au fond des océans. Ces limites constituent de longues chaînes volcaniques sous-marines (au total plus de 60 000 km !) appelées **dorsales océaniques**. Au niveau de ces dorsales, du magma basaltique chaud remonte depuis les profondeurs du manteau et s'étale sur le fond de tous les océans pour former en permanence la « **croûte océanique** » sur une épaisseur de 7 à 8 kilomètres.

Plusieurs dizaines de millions d'années après l'épanchement du magma, poussée par les nouvelles arrivées de magma basaltique et entraînée par les mouvements de convection du manteau supérieur (de l'asthénosphère), la croûte océanique formée dérive et, tôt ou tard mais inévitablement, vient percuter un continent. Formée de matériaux plus froids et plus denses que ceux du continent, la croûte océanique s'enfonce par subduction sous ce continent jusqu'à des profondeurs de 100 km et plus. A de telles profondeurs les températures étant comprises entre 1 000 et 1 200 °C, la croûte océanique fond partiellement (quelques pour cents de sa masse) et recrée un nouveau magma selon le schéma de la figure 1.

† 1 Schéma de la subduction de la croûte océanique sous la croûte continentale

Comme tout magma chaud, le nouveau magma a tendance à remonter vers la surface par « intrusion » à travers la croûte continentale. Le moteur de cette remontée intrusive n'est autre que la poussée d'Archimède créée par la différence de densité entre le magma chaud et la croûte continentale plus froide et plus dense que le magma. S'étendant sur 10 à 50 millions d'années, deux scénarios de remontée sont possibles :

- soit la partie liquide du magma parvient jusqu'à la surface, elle engendre alors un volcanisme généralement très actif, Ceinture de feu du Pacifique, volcanisme de la Cordillère des Andes ou de la Chaîne des Cascades aux USA...)
- soit le magma remonte mais ne parvient pas à atteindre la surface et reste emprisonné sous la croûte continentale où il se refroidit très lentement pendant des millions d'années, il se solidifie en se cristallisant progressivement conduisant à la formation de massifs de roches de type granitique appelés soit « **plutons** » s'ils sont de petite taille (kilométrique) soit **batholites** s'ils sont de grande taille (de quelques dizaines, voire centaines de kilomètres).

Quelques définitions - La réaction de fission - Le fonctionnement d'une centrale nucléaire - Les déchets nucléaires - **Les réserves en uranium**

Lors du refroidissement d'un batholite, entre 1 200 °C et environ 700 °C, chaque composant du magma va cristalliser à une température qui lui est spécifique. Les composants dont la température de fusion est la plus élevée cristallisent en premier, les autres cristallisent successivement dès que leur température s'abaisse en dessous de leur température de fusion. Ainsi, en se solidifiant et en cristallisant à la température qui lui est propre, chaque composant du magma se différencie progressivement des autres. C'est ce mécanisme de cristallisation fractionnée (voir le détail ci-après) qui est à l'origine de l'enrichissement en certains éléments lourds, dont l'uranium, que l'on trouve dans les filons des gisements exploités aujourd'hui.

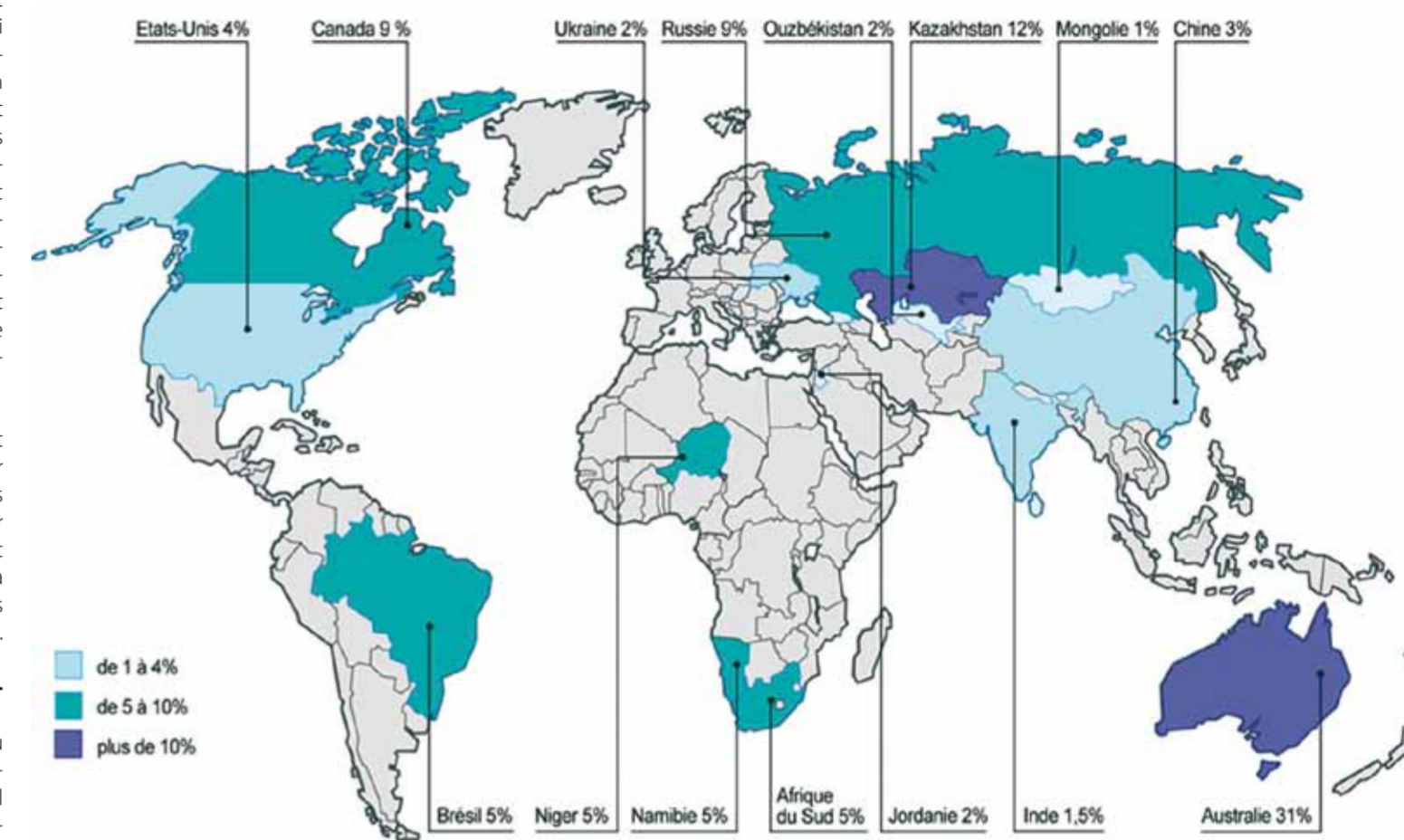
Les plutons et les batholites sont généralement de section circulaire ou elliptique et c'est à leur voisinage que l'on rencontre des filons très « riches » en uranium, des filons dont la teneur atteint 30 grammes par tonne, voire plus, c'est à dire une concentration mille fois supérieure à celle relevée dans les magmas initiaux remontés des millions d'années plus tôt depuis le manteau.

c) Comment expliquer de telles concentrations d'uranium ?

La teneur moyenne en uranium du manteau (84% du volume de la terre) est très faible, seulement 21 milligrammes par tonne. Que s'est-il donc passé pendant la centaine de millions d'années séparant la remontée du magma depuis les profondeurs du manteau et la solidification du batholite ?

La clé du mystère tient entièrement dans le fait que le noyau atomique de l'uranium, avec ses 92 protons et ses 143 ou 146 neutrons, est le plus gros noyau de la création. La taille imposante de son noyau interdit à l'uranium de s'insérer dans les différents réseaux cristallins qui se forment au fur et à mesure du refroidissement et de la cristallisation fractionnée du magma des plutons et des batholites. Les géologues qualifient de manière imagée l'uranium « d'élément incompatible », sous-entendu avec les cristaux formés par les autres éléments. Le mécanisme par lequel se forme un filon riche en éléments « incompatibles » est le suivant :

- la solidification et la cristallisation d'un batholite ou d'un pluton débute par la partie la plus froide, c'est-à-dire par sa périphérie,
- Les atomes d'uranium « incompatibles » et leur cortège d'atomes d'oxygène, n'arrivant pas à s'insérer dans les réseaux cristallins qui se forment, restent confinés dans la partie restée liquide du magma.



2 Répartition et importance relative des principaux producteurs d'uranium. Cette répartition des pays producteurs correspond également à la répartition des ressources identifiées

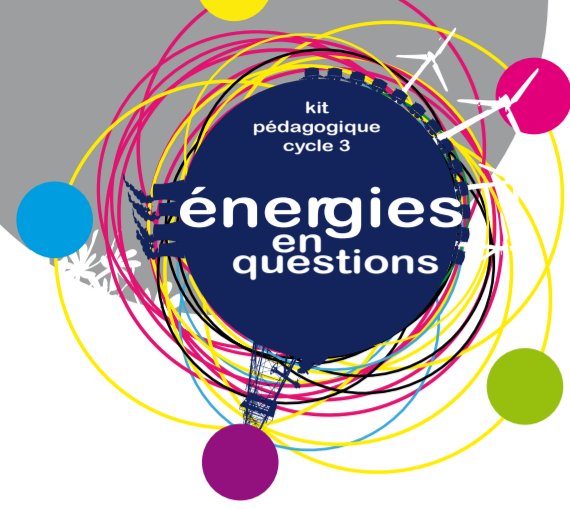
- cette partie liquide (appelé liquide résiduel) s'amenuise au fur et à mesure du refroidissement, de la solidification et de la cristallisation du batholite. Elle est chassée et se concentre vers le centre du batholite resté plus chaud entraînant tous les éléments « incompatibles » qui s'y accumulent, en particulier l'uranium, - c'est ainsi que, vers la fin de la solidification, au centre du batholite, l'enrichissement en éléments incompatibles du liquide résiduel atteint des concentrations très importantes, très supérieures à la concentration initiale du magma, - lorsque vers 700 °C le batholite est entièrement solidifié et cristallisé, le liquide résiduel ultime tente de s'en échapper par les fissures (générées par retrait lors du refroidissement) pour créer des filons, - ces filons, parfois de grande longueur, finissent eux-mêmes par cristalliser donnant naissance à des roches, les pegmatites, mélanges de cristaux très riches en uranium, en autres métaux (étain, tungstène) et divers minéraux, tels les béryls (émeraude, aigue-marine...) et les topazes. Lors de la solidification, l'uranium se dépose dans ces filons sous forme d'oxyde noir d'uraninite. - l'uraninite y restera en place tant que l'érosion (ou la tectonique) n'aura pas déblayé les terrains situés au-dessus de ces filons. - si, après quelques millions d'années, l'érosion ou la tectonique aidant, le filon parvient près de la surface, les infiltrations d'eau avec les carbonates, les phosphates... l'oxygène et les matières organiques qu'elles contiennent, transformeront l'oxyde d'uranium primitif et donneront naissance à divers composés d'uranium. Ce sont sous ces formes physico-chimiques complexes que l'on trouve aujourd'hui l'uranium dans les gisements.

d) Les gisements. Depuis la formation de la terre il y a plus de 4 milliards d'années, le cycle de l'uranium décrit précédemment s'est reproduit plusieurs fois. Le mécanisme lié à « l'incompatibilité » de l'uranium a engendré à la longue sa remontée généralisée et irréversible depuis le manteau vers la lithosphère. Par rapport au manteau, la lithosphère s'est ainsi progressivement enrichie en uranium, la teneur moyenne de la croûte terrestre étant de 3,7 g/tonne et celle des océans d'un peu plus de 3 g/m³, soit 100 fois celle du manteau.

Bien que la concentration de l'uranium et de ses inévitables descendants radioactifs (radium, radons...) dans les sols soit faible, 3 à 4 parties par million (3 à 4 ppm), ces éléments sont assez largement répandus à la surface du globe. Résultat logique du processus de formation des gisements à partir des plutons et des batholites, la carte ci-dessous montre que les principaux gisements actuellement exploités se concentrent, ou sont situés, à proximité des régions où affleurent les anciens socles cristallins granitiques formant les grands continents (Australie, Russie et Kazakhstan, Canada, Brésil, Afrique, ...).

2 Répartition et importance relative des principaux producteurs d'uranium

Les gisements d'uranium ne sont cependant pas toujours situés à proximité immédiate des sites granitiques. L'érosion et le lessivage des régions granitiques par les rivières et les fleuves ont pu libérer de grandes quantités d'uranium que l'on retrouve alors dans des zones de dépôts parfois éloignées, dans des zones qui, à un moment de leur histoire, ont été en dépression, dans les estuaires des grands fleuves ou, encore, dans les zones humides où l'abondance de matière organique favorise la précipitation des complexes organiques contenant l'uranium (cas d'Oklo, voir ci-après...) jusque dans les marécages bretons ! On trouve également des minerais d'uranium exploitables dans des zones semi-désertiques là où des cours d'eau ont abouti à des lacs sans déversoir, lacs aujourd'hui évaporés, ainsi que dans des gisements de phosphates (Jordanie, Maroc...). Un gisement est considéré comme exploitable lorsque la teneur en uranium métal dépasse 0,5 % du minerai.



Une découverte exceptionnelle et stupéfiante fut faite à l'été 1972, son histoire mérite d'être contée.

Alors que l'uranium naturel extrait de tous les gisements à travers le monde présente toujours la même composition isotopique, à savoir 7 grammes d'uranium 235 et 993 grammes d'uranium 238 par kilogramme d'uranium naturel, l'uranium extrait de la mine d'Oklo au Gabon présentait un déficit en uranium 235, le seul des deux uraniums fissile. Où était passé l'uranium fissile manquant ?

On crut tout d'abord à une erreur dans les analyses mais il fallut se rendre à l'évidence, le déficit était bien réel. La cause de cet étonnant écart fut assez rapidement établie grâce à des analyses plus poussées, en particulier sur la présence dans la mine d'Oklo de produits ne pouvant provenir que d'une réaction de fission en chaîne. On put ainsi établir sans aucune ambiguïté que, par le passé, un « réacteur nucléaire » naturel avait fonctionné dans cette mine, il y a approximativement 1,9 milliards d'années. La mine d'Oklo n'est finalement que le vestige d'un ancien « réacteur » nucléaire naturel qui n'aurait pas consommé tout son uranium 235 !

Pour confirmer cette hypothèse, il a été possible de reconstituer précisément les conditions géologiques et environnementales locales tout à fait exceptionnelles qui prévalaient sur le site d'Oklo à cette époque et de comprendre les mécanismes qui ont permis la formation du gisement puis le fonctionnement de ce foyer naturel de fissions. Depuis cette première découverte, toujours dans la même mine, d'autres foyers de fission ont été mis à jour.

Ainsi donc ce n'est pas l'Homme qui a découvert le principe de la fission nucléaire en chaîne ! Leçon d'humilité, comme très souvent d'ailleurs, la Nature l'avait devancé. Otto Hahn, Strassmann, et le trio Joliot-Curie, Alban et Kowarski ne doivent leurs prix Nobel (mérités !) qu'à la « redécouverte » de la fission en chaîne.

Au sujet de la mine d'uranium d'Oklo une autre constatation importante fut faite, elle concerne le stockage géologique des déchets nucléaires. A Oklo il a été constaté que les produits de fission résultant du fonctionnement des réacteurs nucléaires naturels sont restés confinés sur place, ou à leur proximité immédiate, et ce depuis deux milliards d'années.



les gisements (1) : les « réacteurs nucléaires naturels » d'Oklo au Gabon



Pour en savoir plus

(2) Les gisements de thorium

2) Les réserves d'uranium

Plus encore que pour les réserves d'hydrocarbures, les chiffres bruts circulant à propos des réserves d'uranium nécessitent, hors de toute polémique, d'être explicités et commentés.

Selon une estimation publiée en 2009 par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (l'AEN) et par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (l'AIEA), les ressources uranifères identifiées à un coût inférieur à 260 \$ pour un kilogramme de métal (ou 100 \$ par livre d'oxyde U3O8, le « yellow cake ») sont de 6,3 millions de tonnes.

D'autres chiffres circulent, différents, en plus ou en moins. Nous nous en tiendrons à ceux-ci, ils constituent la base des commentaires suivants :

Ce constat confirme la faible mobilité des produits de fission (des déchets nucléaires) dans des formations géologiques stables.

Une seconde découverte tout aussi sensationnelle que les réacteurs d'Oklo mérite d'être rapportée. Sans doute ne s'agit-il que d'une coïncidence...

Jusqu'à aujourd'hui on admettait que les premières traces visibles imputables à la vie sur Terre (traces carbonées, cyanobactéries, algues unicellulaires) remontaient pour certaines à plus de 3 milliards d'années mais on admettait que ce n'était qu'à partir de - 600 millions d'années, et surtout à partir du Cambrien vers -540 millions d'années, que la vie au sein des océans avait littéralement explosé avec l'apparition des **organismes multicellulaires** de taille centimétrique et plus.

En 2008, une équipe du CNRS du Laboratoire de sédimentologie de Poitiers, découvre dans des terrains datés de 2,1 milliards d'années les restes (figure ci-contre) d'environ 250 organismes, manifestement multicellulaires puisque leur taille varie de 1 à 12 cm !

Si la datation des terrains où ces fossiles furent découverts est exacte, il n'y a aucune raison aujourd'hui d'en douter, il s'agit d'une véritable révolution dans le monde des paléontologues : des organismes multicellulaires seraient apparus 1,5 milliards d'années plus tôt que ce qui était admis jusqu'à présent !... A suivre donc.



Moulage d'un des fossiles du gisement de Franceville au Gabon. Ce gisement est daté de 2,1 milliards d'années

Et alors ? Quel est le rapprochement avec les réacteurs nucléaires d'Oklo ? A priori aucun... si ce n'est un rapprochement géographique puisque que la distance séparant la carrière de Franceville où ces fossiles furent découverts et les réacteurs d'Oklo n'est que de 30 km ! Les fossiles de Franceville étant antérieurs de plusieurs centaines de millions d'années au fonctionnement des réacteurs d'Oklo, ces derniers n'y sont pour rien dans leur apparition ! On peut simplement affirmer qu'il y a environ 2 milliards d'années les conditions géologiques et climatiques de la région d'Oklo ont dû être très « particulières ».

a) Sur l'importance des réserves en uranium et en matière fissile « potentielle »

Au rythme de la consommation mondiale actuelle, soit 65 000 tonnes par an, un calcul simpliste aboutirait à la conclusion que les réserves identifiées à faible coût, soit 6,3 millions de tonnes, ne peuvent assurer le fonctionnement des réacteurs à travers le monde que pendant moins d'un siècle. C'est une conclusion bien évidente tout aussi sommaire que le calcul simpliste duquel elle est retirée.

- Comme pour toute évaluation de l'importance du volume d'une réserve, le volume des réserves d'uranium est une fonction du prix auquel on accepte d'acquérir cet uranium. Si l'on acceptait un doublement du prix, les réserves d'uranium facilement récupérable seraient multipliées par trois ou quatre. Elles seraient de l'ordre de 20 à 25 millions de tonnes et deviendraient, toujours à consommation égale, suffisantes pour quatre siècles...

En extrapolant jusqu'à l'absurde, absurde seulement dans les conditions économiques actuelles, on pourrait chercher à extraire l'uranium des océans ou des massifs granitiques qui en contiennent en moyenne 3 à 4 grammes par m³ ou par tonne. Les réserves deviendraient « infinies ».

Le problème des réserves se pose donc en ces termes : en cas de doublement, de triplement ou même plus du prix de l'uranium, la production nucléaire resterait-elle compétitive par rapport aux autres moyens de production ?

L'évaluation des réserves en matières fissiles nécessaires au fonctionnement des centrales nucléaires (et non l'évaluation des seules réserves d'uranium 235 fissile) doit se baser sur d'autres considérations et, parmi ces considérations, la plus importante est que l'uranium 235 n'est pas la seule ressource de matière fissile.

Parmi les autres ressources figurent :

- **Le plutonium.** A partir d'uranium 238 non fissile 140 fois plus abondant que l'uranium 235 fissile, le fonctionnement des réacteurs actuels produit du plutonium fissile, une trentaine de kilogrammes par milliard de kWh. Après retraitement du combustible usé, ce plutonium fissile peut être recyclé et être incorporé mélangé à l'uranium dans des éléments combustibles (combustible MOX). Ce recyclage est néanmoins limité (voir paragraphe 3-2 sur les déchets nucléaires).

Plus prometteurs sont de ce point de vue les surgénérateurs, réacteurs de quatrième génération, spécifiquement conçus pour transformer la matière non fissile (uranium 238, thorium 232 et isotopes pairs des actinides) en matière fissile. Les possibilités offertes par la surgénération permettent d'accroître considérablement la quantité d'énergie que l'on extrait actuellement du seul l'uranium 235.

En pratique, une multiplication de la quantité d'énergie extraite par 10 est assez réaliste.

La surgénération est activement étudiée et expérimentée en Russie, en Inde et récemment en Chine.

- **Le thorium.** Il existe d'énormes réserves de thorium, quatre fois plus abondantes que celles d'uranium naturel. Si le besoin s'en faisait sentir, à l'aide de réacteurs surgénérateurs, ces réserves pourraient également produire de la matière fissile en abondance.

Cette filière est particulièrement étudiée est expérimentée en Inde.

- **Les stocks d'armes nucléaires.** Les traités limitant l'importance des stocks d'armes nucléaires prescrivent la destruction d'une partie de ces stocks. Chaque année, plusieurs centaines de tonnes de matières fissiles (uranium et plutonium) provenant de la destruction des armes nucléaires américaines et russes sont utilisées pour la fabrication d'éléments combustibles destinés à des réacteurs civils. Ces réacteurs « mangeurs de bombes » fournissent aux particuliers et aux industriels chaleur et électricité.

Il s'agit d'une ressource temporaire qui s'épuisera, mais elle méritait d'être mentionnée !

b) Sur la faible sensibilité du nucléaire aux variations du prix de l'uranium.

Dans les centrales brûlant du fuel, du charbon ou du gaz, le coût de ces combustibles fossiles intervient de manière importante, environ pour

les trois-quarts, dans le coût final de l'électricité produite. Compte tenu de l'impossibilité de disposer de stocks supérieurs à quelques mois de consommation, le coût final de la production est directement et immédiatement lié à la variation des cours, à la spéculation ainsi qu'aux aléas de la situation internationale, aux tensions et aux conflits régionaux.

A contrario, le coût du combustible nucléaire intervient pour moins de 15% dans le coût final de la production d'électricité d'origine nucléaire. Fait important, le prix d'achat de l'uranium intervient pour moins de la moitié dans ces 15%. L'autre moitié du coût du combustible nucléaire étant répartie entre la conversion de l'uranium en hexafluorure, l'enrichissement, la fabrication des éléments eux-mêmes, le retraitement du combustible usé et le stockage des déchets.

Une augmentation importante du prix de l'uranium ne pourrait avoir qu'une faible répercussion sur le coût final de l'énergie produite.

3) En conclusion

L'évaluation des réserves en uranium ne doit pas se limiter aux seules réserves actuellement identifiées à un prix inférieur à un niveau donné (par exemple celui retenu par l'AIE de 260 \$/kg de métal) et se limiter à la seule technologie des générations actuelles de réacteurs nucléaires consommant de l'uranium 235.

Si dans le futur l'énergie nucléaire devait jouer un rôle significatif dans l'approvisionnement énergétique mondial, il sera très certainement fait appel aux réacteurs de quatrième génération, à la transmutation des actinides mineurs ainsi qu'aux réserves en thorium dont les réserves sont de 3 à 4 fois plus importantes que celle de l'uranium.

A l'échelle humaine, les réserves de matière fissile naturelle et celles que l'on peut potentiellement obtenir à partir de l'uranium 238, ou du thorium 232, n'imposent pas de limite dans le temps à l'utilisation de l'énergie nucléaire.

En France, pour les 58 réacteurs du parc de production, et pour une production nucléaire de 420 milliards de kWh (térawattheure), l'achat des 8 000 tonnes d'uranium nécessaires à cette production correspond à une dépense annuelle inférieure au milliard d'€. Pour une même production annuelle d'électricité obtenue à partir de centrales thermiques brûlant du gaz ou du charbon, le montant de la facture combustible aurait été de l'ordre de 200 milliards d'€, un montant soumis aux importantes fluctuations des cours mondiaux. La production de ces 420 TWh aurait nécessité la combustion de 200 millions de tonnes de charbon et aurait émis 450 à 500 millions de tonnes de gaz carbonique, c'est-à-dire plus que le total des émissions annuelles et actuelles de CO₂ de la France (390 millions de tonnes).

La diversité des sources d'approvisionnement en uranium ainsi que la passation de contrats de fourniture sur le long terme assurent par ailleurs la stabilité du coût de la production nucléaire. Les sources d'approvisionnement sont pour la plupart, et pour les plus importantes, situées dans des pays établis et stables (Canada, Australie, Russie, Kachstan...). Contrairement aux principaux pays producteurs d'hydrocarbures, ces pays sont relativement à l'abri des tensions ou des conflits susceptibles de les déstabiliser.

La stabilité des coûts de la production est également obtenue du fait à la longueur du cycle de fabrication du combustible (en 5 et 10 ans). La longueur de ce cycle de fabrication nécessite en effet de disposer d'un « roulement », d'un stock d'uranium en cours de traitement, correspondant à plusieurs années de fonctionnement du parc de production. L'importance de ce stock permet d'atténuer les conséquences liées à de brusques variations des cours ou les divers aléas d'ordre géopolitique. Ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures dont le stockage ne peut dépasser quelques mois de consommation.



(2) : les gisements de thorium

Le thorium 232 que l'on trouve à l'état naturel est un cousin germain de l'uranium. Il est quatre fois plus abondant que l'uranium dans le manteau terrestre.

Son noyau atomique ayant sensiblement la même taille que celui de l'uranium (90 protons au lieu de 92), pour les mêmes raisons que précédemment pour l'uranium (élément incompatible), on retrouve le thorium dans les basaltes et sous forme d'oxyde dans les mêmes formations géologiques, les plutons, les batholites et les filons de pegmatite. La comparaison s'arrête là car les minéraux de thorium ne sont pas solubles

dans l'eau. On trouvera les oxydes de thorium en abondance sur les très vieux continents émergés, dans les débris résultant de la décomposition des granites, notamment en Inde. Ces oxydes y sont mélangés à d'autres matériaux très résistants, les « indestructibles », que sont les zircons, les diamants, l'or et d'autres métaux de la famille du platine... quelle promiscuité !

Le thorium 232 que l'on trouve à l'état naturel n'est pas fissile par lui-même mais, tout comme on obtient du plutonium fissile à partir de l'uranium 238 non fissile par absorption d'un neutron

dans un réacteur, de la même manière, par absorption neutronique dans un réacteur surgénérateur, on obtient de l'uranium 233 fissile à partir du thorium 232 qui ne l'est pas.

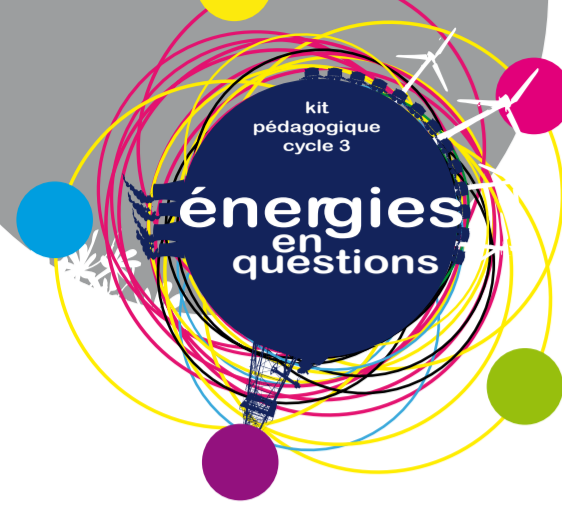
L'Inde qui dispose d'abondantes réserves de thorium, utilise le thorium pour la fabrication de certains combustibles nucléaires expérimentaux. L'utilisation du thorium est envisagée dans des réacteurs surgénérateurs particuliers dits à sels fondus.

Le thorium constitue une réserve très importante de matière potentiellement fissile.



3 Un des fossiles du gisement de Franceville au Gabon (grandeur réelle)





La machine climatique

Dans cette présentation il n'est pas question d'aborder en détail un sujet aussi complexe et aussi controversé que celui du climat et de son évolution. Nous n'aborderons ici que les aspects non controversés et scientifiquement établis nécessaires à l'acquisition d'une bonne compréhension de la « machinerie » climatique générale.

1) Les idées fondamentales à retenir concernant la « machinerie » climatique

a) **La première idée.** La machinerie climatique a pour source d'énergie unique le rayonnement que la Terre reçoit du Soleil sous forme de lumière.

b) **La seconde idée.** La Terre restitue à l'espace sous forme de lumière réfléchie ou de rayonnement infrarouge toute l'énergie qu'elle a reçue du Soleil. Il est nécessaire de préciser cette dernière affirmation parfois mal comprise. Ce n'est qu'à l'échelle de la journée que le bilan s'équilibre entre l'énergie reçue du Soleil durant le jour et l'énergie réémise, surtout pendant la nuit. Le jour la partie éclairée de la Terre reçoit plus d'énergie qu'elle n'en réémet tandis que la nuit, inversement, cette même partie désormais dans l'ombre réémet plus qu'elle ne reçoit. Les transferts d'énergie entre la Terre et l'espace (dit « bilan radiatif ») s'équilibrent globalement au cours d'une journée. Pourquoi seulement globalement ? La raison en est donnée ci-après par la troisième idée.

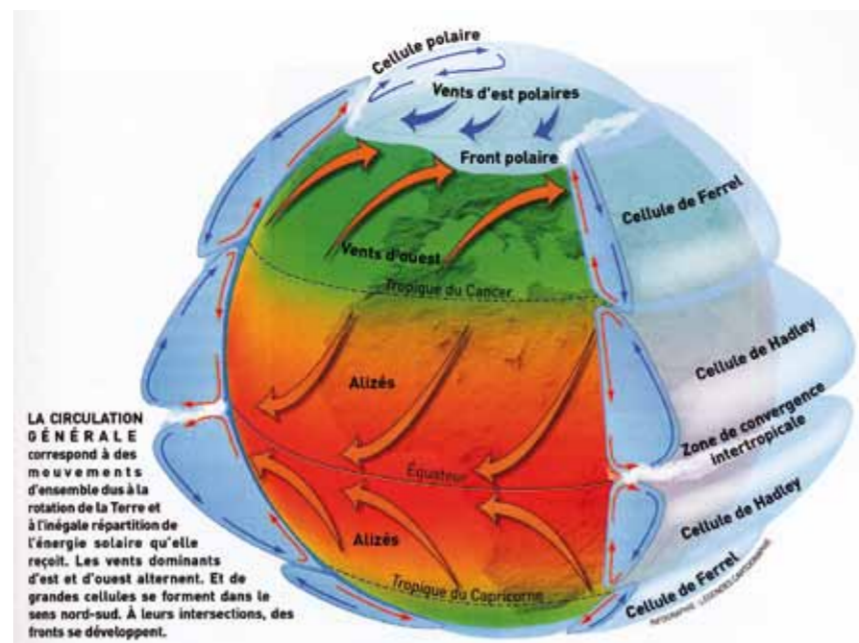
c) **La troisième idée** est essentielle pour la compréhension de la machine climatique. Sur l'échelle de temps d'une journée (ou encore mieux sur celle de l'année), le bilan radiatif de l'ensemble de la Terre est équilibré. Par contre, localement, d'une région à une autre, le bilan radiatif est toujours déséquilibré.

Entre les régions, il existe en effet une forte disparité selon les latitudes, selon que le rayonnement solaire arrive au sol perpendiculairement, en oblique ou de manière rasante (figure 1).

1 L'incidence de l'arrivée des rayons solaires sur la Terre

Du fait de ces différentes incidences entre le rayonnement solaire et la surface des sols :
- aux basses latitudes (équateur et tropiques) l'énergie reçue du Soleil est supérieure à l'énergie réémise par la Terre vers l'espace, - au-delà du 35^{ème} parallèle c'est l'inverse qui se produit, c'est l'énergie réémise vers l'espace qui est supérieure à l'énergie reçue du Soleil.

d) **La quatrième idée.** Les déséquilibres locaux entre les bilans radiatifs, ceux des régions excédentaires « chaudes » (équateur, tropiques) et ceux des régions déficitaires « froides » (au-delà du 35^{ème} parallèle), sont les moteurs qui animent la machinerie climatique.



3 La circulation atmosphérique générale

Ces déséquilibres engendrent les mouvements globaux au sein de l'atmosphère (les vents) et des océans (les courants de surface et les courants en profondeur). Ces mouvements transfèrent vers les hautes latitudes déficitaires en énergie l'excédent de chaleur reçu aux basses latitudes et c'est uniquement grâce à ces transferts atmosphériques et océaniques que le bilan radiatif global de la planète s'équilibre.

2 Les transferts d'énergie en fonction de la latitude

La figure 2 ci-dessous montre que, par rapport aux courants océaniques, la circulation atmosphérique joue un rôle prédominant dans les transferts d'énergie depuis les régions des basses latitudes excédentaires en énergie vers les régions déficitaires des hautes latitudes.

2 Les transferts d'énergie en fonction de la latitude

L'essentiel des phénomènes atmosphériques se déroule dans la troposphère, entre le niveau du sol et une altitude voisine de 10 000 m. Dans cette zone la température décroît régulièrement depuis celle du sol jusqu'à la température de - 60° C vers 10 000 m. Au-dessus de la troposphère se situe la stratosphère entre 10 et 50 km.

3 La circulation atmosphérique générale

Dans la zone équatoriale, par convection, l'air chaud chargé d'humidité monte en générant de très fortes précipitations (figure 3). Tout en restant en altitude (et donc dans les zones assez froides de l'atmosphère) cet air ayant déjà perdu une grande partie de son humidité se dirige vers les latitudes plus élevées. Vers les trentième degrés de latitude, devenu plus froid et encore plus sec, il redescend et se réchauffe progressivement avant de converger de nouveau vers l'équateur qui est une zone dépressionnaire. Au niveau du sol ce mouvement de l'air convergeant vers l'équateur donne naissance aux alizés qui sont les vents dominants aux basses latitudes. En convergeant vers l'équateur les alizés initialement chauds et secs se chargent de nouveau en humidité et, à l'équateur, le début du cycle décrit ci-dessus s'amorce. Un nouveau cycle recommence.

Le mouvement thermique de l'atmosphère entre l'équateur et les tropiques s'effectue au sein de cellules de convection dites cellules de Hadley (flèches rouges et bleues sur la figure précédente). Sous l'effet de la rotation de la Terre (actions des forces de Coriolis) la direction des alizés est très régulière. Aux latitudes plus élevées, les forces de Coriolis étant plus faibles, la circulation atmosphérique est moins régulière, plus tourbillonnaire et instable. Aux latitudes moyennes (au sein des cellules de Ferrel) ce sont des vents d'ouest de surface et de jet-stream en altitude qui génèrent des alternances de systèmes anticycloniques et dépressionnaires. Aux très hautes latitudes (dans les cellules polaires) les vents polaires sont globalement orientés à l'est vers l'ouest.

4 La circulation atmosphérique : les alizés

D'autres éléments influent sur la machine climatique et la circulation atmosphérique. Les principaux sont :

La stratosphère. Son nom provient de la stratification en température de ses différentes couches, la température variant en fonction de l'altitude de - 60°C à 10 000 m à une température voisine de 0 °C vers 50 km d'altitude.

La stratosphère joue un rôle important en absorbant les rayons ultraviolets (couche d'ozone) et en agissant comme un réflecteur renvoyant dans l'espace une partie du rayonnement solaire grâce à la présence d'aérosols (dont les sulfates).

Les nuages. Ils sont tout à la fois des capteurs d'énergie en provenance du soleil et du sol mais aussi des réémetteurs d'énergie soit vers l'espace (réflecteur) soit vers le sol en participant à l'effet de serre. La participation des nuages au climat est complexe mais fondamentale. Ils sont tantôt régulateurs, tantôt amplificateurs de l'effet de serre selon leur structure et leur altitude. La complexité de leur rôle est une des difficultés rencontrées dans l'élaboration des modèles climatiques.

3) La circulation au sein des océans

3-1 LES MOTEURS DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE

A l'échelle de la planète, les grands courants marins sont générés sous les effets conjugués de trois « moteurs » que sont :

- la **différence de densité** entre deux masses d'eau, la densité (ou masse volumique) de l'eau des océans étant fonction de sa température et de sa salinité. Pour comprendre le mécanisme de la circulation océanique générale notons que lorsque deux eaux sont de densités différentes l'eau la plus dense plonge sous la moins dense sans que ces deux eaux se mélangent. C'est précisément la difficulté qu'éprouvent les eaux de densités différentes à se mélanger qui explique le mouvement et la stabilité des grands courants profonds.

En Mer de Norvège pour l'hémisphère Nord, et autour de l'Antarctique pour l'hémisphère Sud, les eaux océaniques se refroidissent suite aux transferts de chaleur vers l'atmosphère polaire froide (ces zones sont symbolisées en jaune sur la figure 5).

Vers - 1,8 °C, une partie des eaux océaniques gèle pour former la banquise. La partie qui gèle expulse son sel ce qui a pour effet d'augmenter la salinité et donc la densité de la partie non gelée, la partie restée liquide. Par rapport aux eaux plus chaudes (car non encore refroidies) arrivant aux pôles par les courants de surface, la partie restée liquide est plus froide, plus salée et plus dense. Les eaux de densités différentes se mélangent difficilement, l'eau plus froide et dense va passer sous les eaux plus chaudes de surface et plonger vers le fond. Ainsi, près des pôles, le long péripole de cette eau froide et dense débute par un « plongeon ».

C'est le commencement d'un long périple à travers l'ensemble des océans. A la faveur de diverses péripéties, et de lentes remontées vers la surface, des transferts d'énergie (de chaleur) vont s'effectuer entre cette eau initialement froide, l'atmosphère et d'autres masses d'eau plus chaudes, en particulier le long des côtes équatoriales où le réchauffement s'effectue par diffusion avec des masses d'eau de surface plus chaudes. Finalement, dans les océans Pacifique et Indien, au cours de leur long périple les eaux polaires initialement froides, salées et denses se réchauffent progressivement et remontent vers la surface.

Après leur remontée, ces eaux sont reprises par les courants de surface et ramenées en fin de périple vers les zones polaires de l'Arctique et de l'Antarctique. Comme décrit précédemment, elles vont partiellement geler et la partie restée liquide plonger de nouveau et recommencer un nouveau périple à travers des océans.

5 La circulation océanique profonde

Les autres paramètres influant sur la circulation des courants marins sont : **les vents et les forces de Coriolis** engendrées par la rotation de la Terre. Bien qu'inférieurs à ceux de l'atmosphère, les transferts d'énergie qui s'opèrent grâce aux océans sont colossaux. Ils s'effectuent au travers de deux mécanismes d'échange, les échanges d'énergie cinétique entre les masses d'eau mises en mouvement et les échanges de chaleur entre les océans et l'atmosphère.

Ces derniers échanges s'effectuent en deux temps, tout d'abord par **l'évaporation** de l'eau des océans sous l'action du soleil puis ultérieurement par **la condensation de la vapeur d'eau** formée. Lors de sa condensation la vapeur d'eau cède à l'atmosphère sa chaleur latente de vaporisation (c'est-à-dire l'énergie qui a été « dépensée » pour la vaporiser).

5 Pour en savoir plus Les transferts des océans vers l'atmosphère

3-2 LES DEUX TYPES DE CIRCULATION OCÉANIQUE

On distingue la circulation de surface (les courants de surface) et la circulation de profondeur (courants profonds).

4 La circulation des courants de surface

La circulation de surface affecte une couche superficielle dont la profondeur est inférieure au kilomètre. Chaque océan (Pacifique, Indien, Atlantique...) est le siège de courants de surface tournant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord, en sens contraire dans l'hémisphère Sud. Les vents et les forces de Coriolis dues à la rotation de la Terre sont les principaux moteurs de cette circulation de surface. Des courants particuliers, non affectés par la rotation de la Terre, circulent près des pôles.

5 La circulation des courants profonds (circulation thermohaline)

La circulation profonde, dite thermohaline de thermo température et halos le sel, a pour moteur la différence de densité des eaux. Plus une eau est froide et salée plus elle est dense et plus elle aura tendance à « plonger » sous des eaux plus chaudes ou moins salées, donc moins denses.

Si, à partir du Pôle Nord, on pouvait observer et suivre en permanence une masse d'eau océanique froide, salée et donc dense, son observation montrerait que cette masse d'eau effectue un périple planétaire qui la mène depuis le pôle à travers tous les océans avant... de revenir à son point de départ ! La durée d'un périple complet est de l'ordre de 500 à 1 000 ans.

5 Pour en savoir plus La circulation océanique profonde

Du fait de la fabuleuse quantité d'énergie transportée par la circulation et de l'inertie thermique due à la durée du périple (de 500 à 1 000 ans), les océans sont les grands stabilisateurs du climat sur Terre. Ils stabilisent et « lissent » les phénomènes climatiques sur le court terme en atténuant leurs variations, ils « ralentissent » de ce fait les évolutions sur le long terme mais, en contrepartie, les océans « enregistrent » toutes les perturbations importantes. Ils « les mémorisent » et surtout... « ne les oublient pas », et ce pendant des siècles, voire un millénaire. Du point de vue du climat, la circulation profonde revêt donc une très grande importance. Ayant enregistré l'histoire passée du climat sur le dernier millénaire, elle détermine en grande partie le climat actuel. En enregistrant l'histoire actuelle elle déterminera le climat du futur. A travers la circulation profonde des océans, toute perturbation importante se répercutera inévitablement sur le long terme.

4) Les échanges d'énergie entre les océans et l'atmosphère

Deux types d'échanges se conjuguent :

a) Un transfert d'énergie dans le sens allant **de l'atmosphère vers les océans**. Ce transfert s'effectue sous forme d'échange d'énergie cinétique. Les vents cèdent une partie de leur énergie cinétique et mettent en mouvement les masses d'eau. Les vents donnent naissance aux courants de surface (aux latitudes peu élevées le sens de rotation des courants est déterminé par la rotation de la Terre)

b) Un transfert d'énergie dans le sens **des océans vers l'atmosphère** par échange d'eau et de vapeur d'eau. Dans un premier temps l'énergie en provenance du Soleil évapore l'eau des océans. L'atmosphère se charge en vapeur d'eau. Dans un second temps, en se condensant sous forme de nuages puis de précipitations (de pluies), cette vapeur d'eau réchauffe l'atmosphère en lui cédant l'énergie qu'il lui a été fournie pour la faire passer de l'état d'eau-liquide à l'état d'eau-vapeur. Cette énergie est appelée la **chaleur latente de vaporisation**. Cette énergie est particulièrement importante (voir « pour en savoir plus sur les transferts des océans vers l'atmosphère »). Au gré de la circulation atmosphérique générale, l'atmosphère transfère les calories qu'elle a récupérées de la condensation de la vapeur d'eau vers les zones de latitude plus élevée déficitaires en énergie.

5) Les échanges gazeux entre les océans et l'atmosphère

Ces échanges sont nombreux et complexes. On évoquera les deux principaux.

- Les océans absorbent le gaz carbonique de l'atmosphère, on estime qu'actuellement ils absorbent le quart du CO₂ émis par l'activité humaine, soit environ 8 milliards de tonnes par an sur les 32 milliards de tonnes émises. Cette absorption de CO₂ acidifie progressivement les océans. Indépendamment des effets du réchauffement des eaux, si on ne veut pas créer d'importants bouleversements de la biodiversité (du phytoplancton à la base de la chaîne alimentaire océanique) et si l'on ne veut pas trop acidifier les océans, il faudra impérativement limiter la teneur en CO₂ de l'atmosphère.

- A leur tour les océans émettent des gaz dans l'atmosphère en particulier des composés soufrés qui s'oxydent en produisant des sulfates. Ces sulfates se regroupent en aérosols dont le rôle est primordial dans les phénomènes de condensation et de formation des nuages ainsi que dans la réflexion du rayonnement solaire au niveau de la stratosphère.

La notion de chaleur latente de vaporisation à la base des échanges d'énergie thermique entre les océans et l'atmosphère est un peu délicate. Prenons une casserole, remplissons la d'eau et chauffons cette eau en ayant pris au préalable soin d'y plonger un thermomètre. Dans un premier temps la température de l'eau augmente régulièrement jusqu'à ce qu'elle entre en ébullition. Dès que l'on atteint la température d'ébullition, et bien que l'on continue à chauffer l'eau, à lui apporter des calories, la température reste constante, soit 100°C au niveau de la mer.

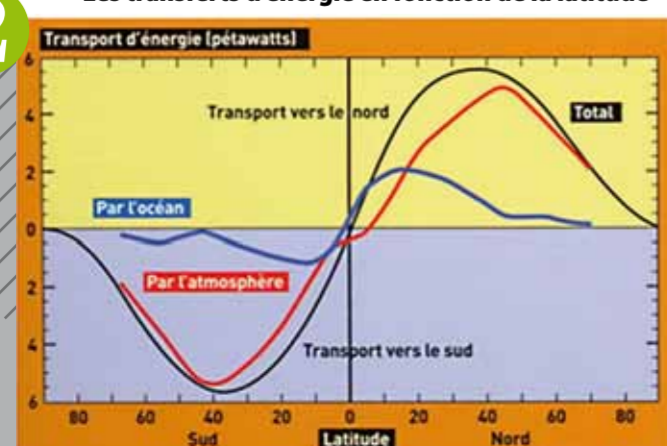
L'explication de ce phénomène est que toutes les calories que l'on continue d'apporter à l'eau déjà en ébullition sont uniquement destinées à la faire changer d'état, à la faire passer de l'état liquide à l'état vapeur, tout en restant à la même température de 100°C. La quantité de chaleur à fournir pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur (à température constante) s'appelle la chaleur latente de vaporisation. Elle s'exprime en joule par kilogramme. Pour l'eau sa valeur est particulièrement élevée : 2 250 kJ/kg (ou 540 kilocalories/kg)

En sens inverse, lorsque la vapeur d'eau se condense, c'est-à-dire quand la vapeur retourne à l'état d'eau liquide, elle restitue les calories qu'il a fallu « dépenser » pour la vaporiser, pour passer de l'état liquide à l'état vapeur.

Illustration : la vapeur qui s'échappe de la casserole où cuit la soupe, et qui se condense sous forme de buée, « cède » sa chaleur latente de vaporisation aux vitres froides des fenêtres de la cuisine. Résultat inattendu, faire cuire la soupe a pour effet de réchauffer les vitres de la cuisine...

5 Les transferts des océans vers l'atmosphère

2 Les transferts d'énergie en fonction de la latitude



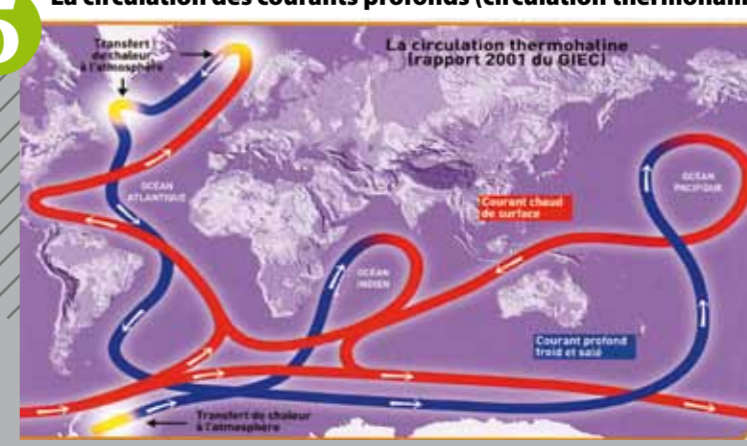
2 Les transferts d'énergie en fonction de la latitude

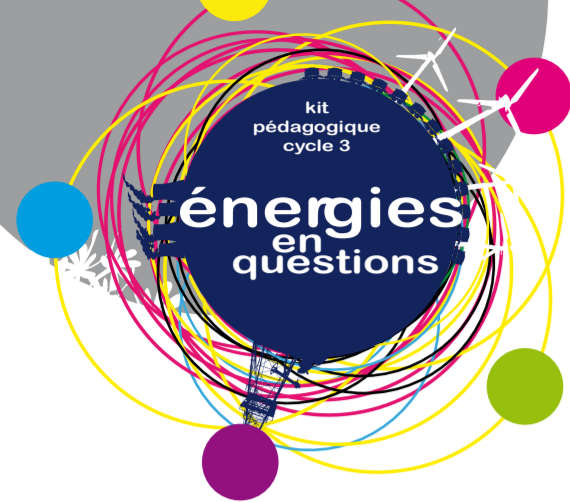
Les observations par satellites permettent d'évaluer les flux d'énergie échangés entre régions (figure 2). La quantité d'énergie échangée est gigantesque, de l'ordre de 10 000 fois l'énergie totale consommée annuellement par l'humanité. Cette énergie se comptabilise en milliers de milliards de kWh (en pétawatt, soit 10¹⁵ watt). Dans l'hémisphère Nord et aux basses latitudes, le transport océanique de l'énergie par les courants marins prédomine tandis que le transport atmosphérique y est faible. Au-delà du 20^{ème} parallèle c'est le transport atmosphérique qui devient prédominant. Dans l'hémisphère Sud, le transport atmosphérique est toujours prédominant. Cela s'explique par la prédominance de la surface des océans par rapport à celle des continents

4 La circulation des courants de surface



5 La circulation des courants profonds (circulation thermohaline)





L'effet de serre

1) L'effet de serre : un phénomène complexe, difficile à appréhender

D'une manière simple, sinon simpliste, on pourrait se contenter d'expliquer l'effet de serre en assimilant l'atmosphère terrestre à un édre-douillet qui tiendrait notre planète bien au chaud, tout comme notre édre-douillet, l'hiver sur notre lit. Et en rester là ! Serait-ce suffisant ? Malheureusement non. Si l'on veut comprendre le mécanisme de l'effet de serre, comprendre ce qui en modifie le fonctionnement et comprendre les conséquences des modifications de ce fonctionnement sur nos modes de vie et sur le futur de l'humanité, il est nécessaire de ne pas en rester à cette aimable image un tantinet sécurisante de l'édre-douillet de nos grands-parents.

Le phénomène étant assez complexe, il est proposé de l'aborder progressivement par étapes au paragraphe 1-1. Cette première approche est complétée aux chapitres 2 et 3 par des explications plus détaillées (« Pour en savoir plus ») et par une analogie avec la vie de tous les jours expliquant l'interaction entre les atomes des gaz à effet de serre et les rayonnements lumineux et infrarouges... Rien de bien effrayant à condition de s'y atteler !

Le chapitre 4, historique de la prise en compte de l'effet de serre, est moins « pointu ». Il est possible d'y accéder directement. Il est consacré aux effets de l'augmentation de la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à l'augmentation de la température moyenne de la planète et aux conséquences potentielles de ces augmentations sur le climat.

1-1 L'APPROCHE DE L'EFFET DE SERRE PAR ÉTAPES

Première étape : l'énergie qui nous parvient du Soleil nous parvient sous forme de lumière.

L'énergie qui nous parvient du Soleil au travers de l'atmosphère nous arrive essentiellement sous la forme de **lumière visible** (voir le chapitre consacré au soleil).

En décomposant cette lumière à l'aide d'un prisme, on montre que la lumière visible est un rayonnement composé de plusieurs rayonnements de couleurs différentes : violet, bleu, vert, jaune, orange et rouge. Le maximum de l'intensité du rayonnement solaire se situe dans le jaune (figure 1 spectre de gauche en couleur).

1 Les spectres d'émission et d'absorption des rayonnements lumineux et infrarouges

Une autre partie de l'énergie du Soleil nous parvient sous forme de rayonnements non visibles à l'œil. Ce sont les rayons ultraviolets, pour la plupart arrêtés par la haute atmosphère, et les rayons infrarouges que l'on perçoit sous forme de chaleur perceptible par le toucher.

Le rayonnement émis par le Soleil, la lumière, est caractéristique d'un corps dont la température est voisine de 6 000 °K.

Seconde étape : la Terre réémet vers l'espace toute l'énergie qu'elle reçoit du Soleil. A travers son atmosphère, la Terre réémet vers l'espace toute l'énergie qu'elle reçoit du Soleil. S'il n'en était pas ainsi, la température moyenne à la surface de la Terre ne cesserait d'augmenter et depuis que le Soleil brille, depuis plus de 4 milliards d'années, la Terre serait entièrement en fusion... et nous ne serions pas là pour dissenter sur l'effet de serre !

Il est essentiel de savoir que, durant le jour, la Terre reçoit du Soleil plus d'énergie qu'elle ne peut en réémettre. Par contre, pendant la nuit, lorsqu'elle ne reçoit plus d'énergie du Soleil, la Terre continue de réémettre l'énergie reçue en excédent durant le jour. Ainsi, à l'échelle de la journée, les quantités d'énergie reçues et les quantités réémises sont équivalentes (au très faible écart de température près pouvant exister entre une journée et la suivante).

Il existe donc un « retard » entre le moment où l'énergie solaire pénètre dans l'atmosphère et le moment (en fin de nuit) où la Terre a fini de restituer toute l'énergie reçue précédemment. C'est ce retard qui est à l'origine de l'effet de serre. Reste à expliquer pourquoi ce retard... c'est ici que l'explication se corse !

En conclusion de cette seconde étape, à l'échelle de l'année l'énergie reçue est rigoureusement égale à l'énergie réémise. Ce bilan parfaitement équilibré permet de maintenir la température la Terre globalement constante, en moyenne à 15°C (température au niveau du sol).

Troisième étape : la Terre réémet l'énergie reçue du Soleil sous forme de rayonnement infrarouge.

La Terre restitue vers l'espace l'énergie qu'elle a reçue, non pas sous forme de rayonnement lumineux (correspondant à la température de surface du Soleil à 6 000 °K) mais sous forme de **rayonnement infrarouge**.

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement perceptible par le toucher (par le derme de la peau). Ce que dans la vie courante on appelle la « chaleur » émise par un corps « chaud » n'est autre que la perception par le derme de la peau du rayonnement infrarouge émis par ce corps.

Le rayonnement infrarouge réémis par la Terre est caractéristique de sa température. C'est le rayonnement infrarouge d'un corps relativement froid par rapport au Soleil. Pour être tout à fait exact, la Terre réémet un rayonnement infrarouge vers l'espace à une température de moins 18 °C (soit 255 °K en degrés Kelvin) qui est la température à laquelle la Terre est « vue depuis l'espace ». Le spectre de ce rayonnement infrarouge de la Terre est donné à la figure 1 (spectre de droite, grisé). Nous verrons ultérieurement que l'écart de 33 °C entre la température moyenne que l'on mesure sur la Terre au niveau du sol (15 °C) et la température de la Terre « vue depuis l'espace » (-18 °C) est précisément dû à l'effet de serre, à l'énergie emmagasinée au sein de l'atmosphère sous forme de chaleur par cet effet.

Sans effet de serre nous serions condamnés à vivre à la température des congélateurs, à moins 18°C ! L'effet de serre n'a donc pas que des aspects négatifs... à condition qu'il reste à peu près ce qu'il est actuellement !

Quatrième étape : l'atmosphère terrestre ne transmet pas de la même manière la lumière visible émise par le soleil et le rayonnement infrarouge réémis par la Terre.

Exposée de manière abrupte : L'atmosphère est « transparente » à la lumière qui nous parvient du Soleil, elle est relativement « opaque » au rayonnement infrarouge réémis par la Terre. Dans ces conditions, tandis que la lumière du Soleil pénètre « facilement » à travers l'atmosphère, on conçoit intuitivement que l'énergie réémise par la Terre sous forme de rayonnement infrarouge ait plus de difficultés que la lumière à la traverser et à s'échapper vers l'espace. D'où (comme déjà signalé à la seconde étape) le retard apporté au rétablissement de l'équilibre journalier entre l'énergie reçue du Soleil et l'énergie réémise vers l'espace. L'énergie « stagne » donc au sein de l'atmosphère sous forme d'infrarouges (de chaleur) avant de pouvoir s'en échapper.

Cinquième étape : l'opacité de l'atmosphère aux rayons infrarouges est due à l'absorption des infrarouges par les molécules de certains gaz présents dans l'atmosphère.

+ Pour en savoir plus
Commentaires sur la figure 1

Les gaz qui tendent à s'opposer à la transmission des rayons infrarouges sont appelés « **gaz à effet de serre** ». Par son abondance dans l'atmosphère, la vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre. D'autres gaz participent à l'effet de serre : le gaz carbonique, le méthane, les oxydes d'azote et de nombreux composés soufrés, chlorés ou fluorés... etc.

Le mécanisme à l'origine de l'absorption du rayonnement infrarouge par ces différents gaz est assez complexe, il est présenté (pour ceux qui souhaitent s'y aventurer...) dans le paragraphe « Pour en savoir plus » traitant de la transparence sélective de l'atmosphère aux infrarouges.

+ Pour en savoir plus
la transparence sélective de l'atmosphère aux rayonnements

Que retenir d'essentiel sur la transparence de l'atmosphère ?

- que l'atmosphère, l'air que nous respirons, est composée pour l'essentiel de 80 % d'azote et de 20% d'oxygène et que les **molécules diatomiques** de ces deux gaz (c'est-à-dire composées de deux atomes identiques) sont assez transparentes aux rayonnements qu'ils soient lumineux ou infrarouges (hormis pour les ultraviolets absorbés par l'oxygène)

- que les **molécules gazeuses comportant trois atomes ou plus**, telles celles de la vapeur d'eau (H₂O), du gaz carbonique (CO₂), du protoxyde d'azote (NO₂), de l'ozone (O₃) composées de trois atomes chacune ou du méthane (CH₄) qui comporte cinq atomes... absorbent le rayonnement infrarouge. Elles ne l'absorbent que dans des conditions particulières, seulement lorsque la fréquence du rayonnement infrarouge correspond à la fréquence de résonance de ces molécules.

La figure 1 (spectre de droite en grisé) montre, en fonction des différents gaz à effet de serre, quelles sont les longueurs d'ondes pour lesquelles le rayonnement infrarouge est absorbé. Par exemple, le gaz carbonique absorbe les infrarouges dont les longueurs d'onde sont comprises entre 15 et 17 micromètres (µm), la vapeur d'eau absorbe les infrarouges de longueur d'onde comprise entre 20 et 100 µm.

Sixième étape : de manière physiquement indéniable, l'augmentation de la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère accentue l'effet de serre.

En augmentant la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère on augmente son opacité au rayonnement infrarouge. C'est une réalité physique indiscutable que l'on peut exprimer différemment : augmenter l'opacité de l'atmosphère aux infrarouges a pour effet de retarder la restitution vers l'espace de l'énergie reçue du soleil, de favoriser la stagnation dans l'atmosphère de l'énergie reçue du Soleil avant que cette énergie ne soit restituée vers l'espace. Exprimé sous une forme plus simple : la chaleur s'accumule au niveau des sols et au sein de l'atmosphère au cours de la journée, cette chaleur est intégralement restituée à l'espace, mais avec retard, le retard accumulé le jour étant rattrapé la nuit.

Septième étape : l'augmentation de l'effet de serre a-t-elle des répercussions sur le climat ?

Il serait très présomptueux de répondre de manière tranchée et catégorique à cette interrogation. La réponse soulève la polémique. Ce qui est certain, car physiquement expliqué et démontré, est que a) la température moyenne de l'atmosphère croît lorsque l'effet de serre augmente et que, b) l'effet de serre augmente si la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère augmente.

Il est par contre plus difficile d'évaluer l'influence de l'élévation des températures sur le climat et d'en évaluer les conséquences. Il est quasiment certain que cette influence n'est pas nulle. Ces sujets font l'objet de nombreuses recherches et d'études de la part de la communauté scientifique internationale qui tente de modéliser précisément et de plus en plus finement les phénomènes associés à l'augmentation de l'effet de serre et de la température moyenne de la planète.

Au chapitre 4, ci-après, sont présentés les quelques éléments de réponse, tout au moins les éléments faisant largement consensus au sein de la communauté scientifique.

Pourquoi l'atmosphère est-elle transparente à la lumière et opaque aux infrarouges ? Pour l'expliquer, il nous faut descendre jusqu'à l'échelle des atomes et des molécules gazeuses qui composent l'atmosphère et observer comment la lumière visible et le rayonnement infrarouge interagissent avec ces molécules.

a) Transmission des rayonnements, lumière visible et infrarouges à travers l'atmosphère.

Sans entrer dans la mystérieuse nature à la fois corpusculaire et ondulatoire des rayonnements électromagnétiques, nous retiendrons que :

- les rayonnements électromagnétiques (la lumière, les rayons infrarouges...) transportent l'énergie de manière discontinue, par « paquets élémentaires d'énergie ». Chaque paquet d'énergie, chaque « **quantum élémentaire d'énergie** », est « **véhiculé** » par un « **photon** », - la quantité élémentaire d'énergie transportée par un photon est d'autant plus importante que la fréquence associée au photon est élevée (ou que la longueur d'onde associée à ce photon est faible).

À titre d'exemple, un « photon ultraviolet » de fréquence élevée (de longueur d'onde faible, 0,2 µm) transportera 75 fois plus d'énergie qu'un « photon infrarouge » de fréquence plus faible (de longueur d'onde plus importante, 15 µm).

b) Les molécules gazeuses de l'atmosphère

Nous retiendrons également que les photons interagissent préférentiellement avec certaines molécules gazeuses composant l'atmosphère.

L'essentiel des molécules gazeuses de l'atmosphère, celles d'azote (80% de l'atmosphère) et d'oxygène (20 % de l'atmosphère) sont formées par la réunion de deux atomes identiques. Elles sont symétriques et n'interagissent pratiquement pas avec les rayonnements lumineux et infrarouges, elles les absorbent peu et ne participent pas de ce fait à l'effet de serre.

Il n'en est pas de même des molécules des autres gaz présents en faibles proportions dans l'atmosphère, dès lors que les molécules de ces gaz sont constituées de trois atomes ou plus : vapeur d'eau, gaz carbonique, l'oxyde d'azote, méthane ainsi que de nombreux autres composés gazeux

carbonés, chlorés ou fluorés. L'atmosphère contient également une quantité non négligeable de poussières et d'aérosols qui participent de manière inégale mais non négligeable à l'effet de serre.

c) Les interactions entre les rayonnements et les molécules gazeuses de l'atmosphère

Les molécules comportant trois atomes ou plus sont dissymétriques et interagissent avec certains photons du rayonnement infrarouge, chacune interagissant selon sa structure avec les photons dont la fréquence correspond à l'une des fréquences de résonance de la structure de la molécule.

Exemple d'interaction (figure 1) : les molécules de gaz carbonique absorbent totalement le rayonnement infrarouge entre 15 et 17 µm. La vapeur d'eau absorbe entièrement le rayonnement infrarouge entre 25 et 100 µm.

d) La déséxcitation des molécules. Lorsqu'une molécule gazeuse absorbe un photon, elle absorbe l'énergie transportée par ce photon et se retrouve dans un état énergétique dit « état excité », un état qu'elle va rapidement quitter pour revenir dans un état énergétique plus stable, jusqu'à retrouver à terme son état énergétique fondamental. En se déséxcitant, la molécule restitue l'énergie du photon absorbé en réémettant un ou plusieurs photons selon la manière dont elle retourne directement ou non à son état énergétique stable. L'énergie de chacun des photons émis par la molécule au cours de sa déséxcitation est inférieure à l'énergie du photon initial, au maximum elle est égale à celle du photon initial.

Le point fondamental qui fournit l'explication physique de l'effet de serre, est que les photons réémis par les molécules sont réémis de manière totalement aléatoire, dans des toutes les directions, tantôt, plutôt vers l'espace, tantôt, plutôt vers le sol.

D'un point de vue statistique, la moitié des photons sont réémis plutôt en direction de l'espace, l'autre moitié est plutôt réémise vers la Terre... ce qui n'est pas le plus court chemin pour un photon pour s'échapper vers l'espace !

Les photons réémis n'arrivent donc pas à s'échapper directement vers l'espace d'autant que la moitié des chances qui avaient été réémis vers l'espace sont pour la plupart immé-

diatement absorbés par d'autres molécules gazeuses qui les réémettent à leur tour dans des directions totalement aléatoires... la moitié d'entre eux retournant d'ailleurs vers le bas ! Ce scénario de capture et de réémission se renouvelle un grand nombre de fois avant que le photon puisse enfin s'échapper vers l'espace. Un véritable parcours du combattant !

Analogie illustrant au niveau atomique l'interaction entre l'atmosphère et le rayonnement infrarouge.

Faisons une pause et tentons d'illustrer par une analogie le pénible parcours des photons infrarouges et leurs multiples rencontres avec les molécules des gaz à effet de serre !

Les photons sont dans une situation semblable à celle d'un acheteur imprévoyant qui déciderait la veille de Noël de faire ses emplettes dans un grand magasin. Dès qu'il pénètre dans le magasin, il est happé par une foule qui s'agite en tous sens dans le plus grand désordre (on reconnaît ici l'agitation thermique des molécules !). Balloté en tous sens, il est alternativement stoppé puis propulsé au hasard de la bousculade. Sans cesse pris puis rejeté par la foule, il est incapable d'aller là où il souhaite... en particulier vers la sortie qu'il voudrait pourtant retrouver au plus vite !

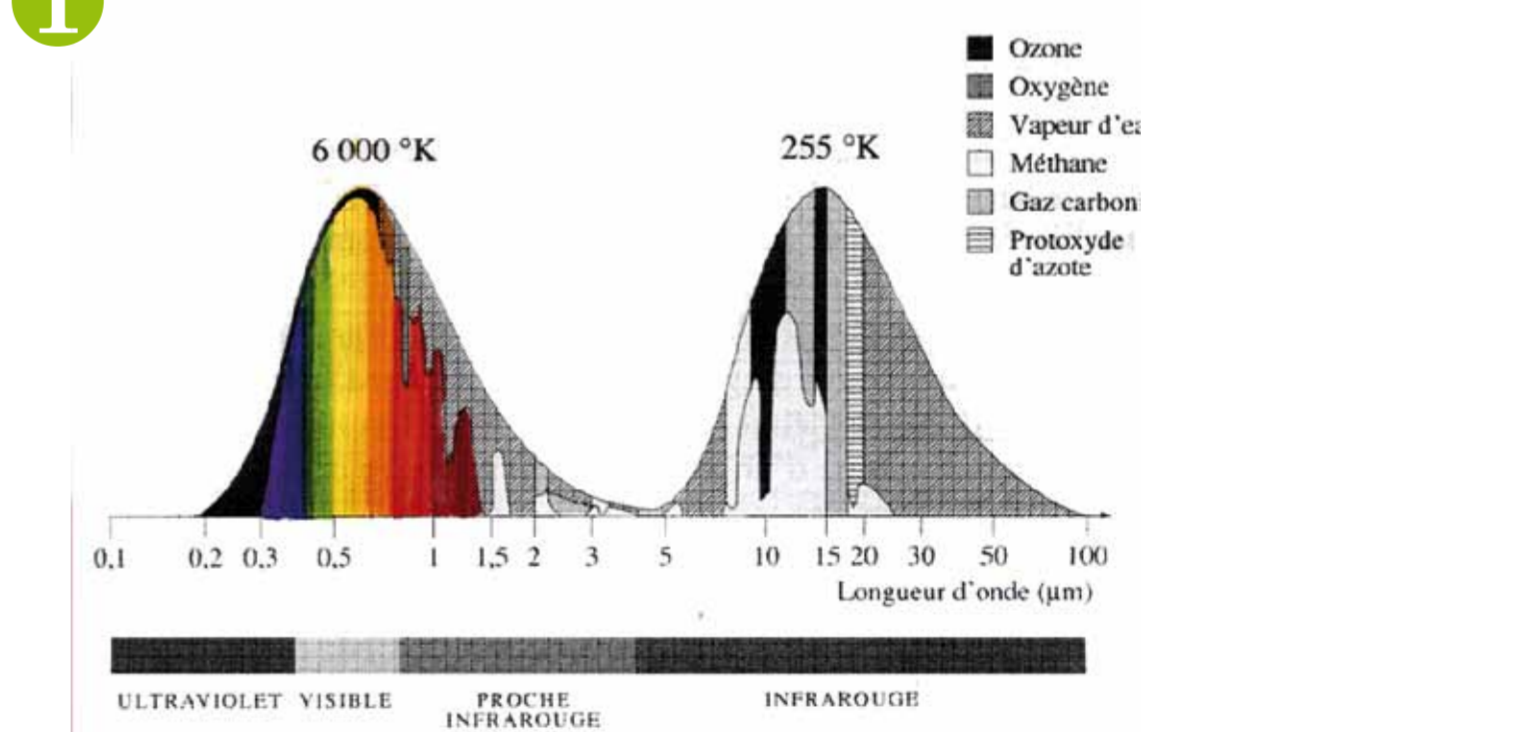
Le malheureux photon infrarouge est dans une situation similaire à notre acheteur, sans cesse absorbé puis réémis dans n'importe quelle direction, généralement, sous une forme toujours plus dégradée et de moins en moins énergétique au fur et à mesure de ses rencontres. On conçoit aisément que dans ces conditions il éprouve les pires difficultés à traverser l'atmosphère, à se frayer un chemin vers l'espace, tandis que, durant la journée, les photons transportant la lumière en provenance du soleil continuent d'arriver sans trop d'encombre au travers d'une atmosphère qui leur est transparente.

Durant la journée, les entrées de photons étant plus nombreuses que les sorties, « l'embouteillage » (l'effet de serre !) est inévitable. Il persistera (jusqu'à tard dans la nuit) tant que le « surplus » des photons accumulés pendant le jour ne sera pas résorbé.

+

 La transparence sélective de l'atmosphère aux rayonnements est à la base de l'effet de serre

1 Les spectres d'émission et d'absorption des rayonnements lumineux et infrarouges



+

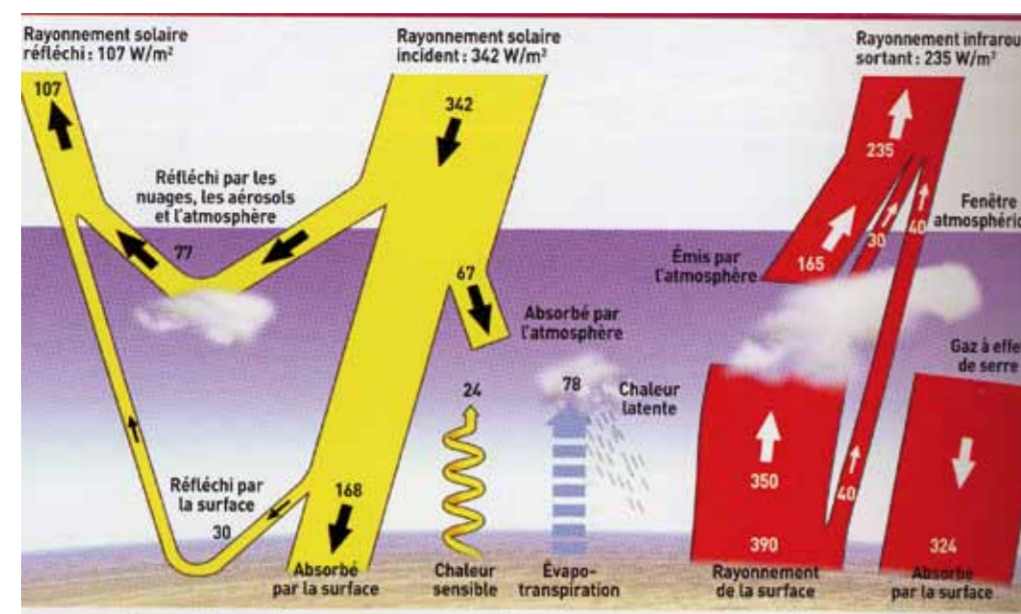
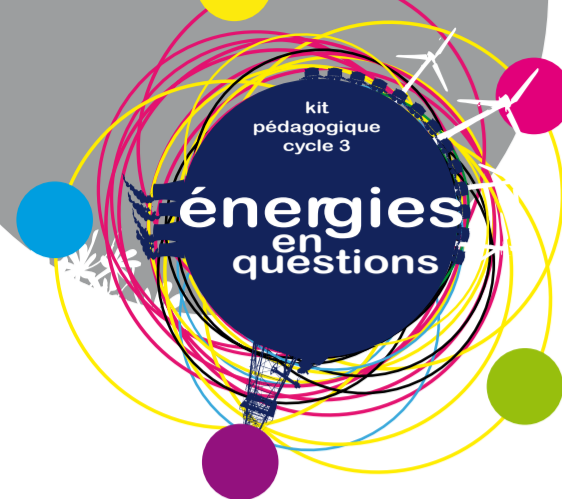
 Commentaires sur la figure 1

A gauche, en couleur, est représenté le **spectre de la lumière émise par le Soleil**, ce spectre s'étend de l'ultraviolet (0,2 µm) au proche infrarouge (2 µm) avec un maximum d'intensité dans le jaune (0,6 µm). Ce spectre correspond à la température d'émission de la surface du Soleil, 6 000 °K.

A droite, en gris, est représenté le **spectre des émissions infrarouges de la Terre** entre 5 et 100 µm avec un maximum d'intensité pour une longueur d'onde de 15 µm. Ce spectre correspond à la température d'émission de la Terre (sols et atmosphère) vue de l'espace, -18° Celsius ou, exprimée en

dégrés absolus, 255 °Kelvin. Ces deux températures 6 000 °K et 255 °K déterminent à elles seules la forme du spectre des rayonnements, celui émis par le Soleil (à gauche) et celui réémis par la Terre (à droite). Les zones grisées des deux spectres correspondent aux longueurs d'onde absorbées par les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre : vapeur d'eau, gaz carbonique, ozone, méthane, protoxyde d'azote...

On remarque que l'étendue des zones grisées d'absorption est beaucoup plus importante dans le domaine du rayonnement infrarouge que dans le domaine de la lumière visible. Dans le domaine de la lumière visible, seule la vapeur d'eau est un absorbant notoire de la lumière.



2 Bilan global moyen rendant compte de l'effet de serre (d'après le GIEC)

2) Bilan des échanges d'énergie à l'échelle de la planète

2-1 LES ÉCHANGES ENTRE L'ESPACE, L'ATMOSPHÈRE ET LES SOLS

Le bilan énergétique des échanges entre l'espace, l'atmosphère et les sols est présenté par la figure ci-dessous. A l'image de l'effet de serre lui-même, le bilan est fort complexe à établir...

2-2 QUANTIFICATION DE L'EFFET DE SERRE

La quantification de l'effet de serre se base sur les bilans explicités ci-après :

A) La partie illustrée en jaune.

En moyenne, et pour l'ensemble de la Terre, l'énergie solaire arrivant par le sommet de l'atmosphère est de 342 watt par mètre carré (342 W/m² en jaune au milieu et en haut du schéma). Une partie de ce rayonnement (107 W/m² soit 31 %) est directement réfléchi par les nuages et les aérosols de l'atmosphère qui en réfléchissent 77 W/m² et par les sols, 30 W/m². L'autre partie du rayonnement (69 %) est absorbée soit par la surface des sols (168 W/m²) soit par l'atmosphère (67 W/m²). Cette partie non réfléchi est transformée en chaleur et a pour effet d'augmenter la température des sols et de l'atmosphère.

B) La partie illustrée en rouge.

Elle correspond :
 - aux échanges entre l'atmosphère, les sols et les océans
 - à la restitution de l'énergie vers l'espace soit 235 W/m² (en haut à droite du schéma)
 Le bilan global est bien équilibré puisque l'énergie incidente arrivant (342 W/m²) est bien la somme de l'énergie directement réfléchi (107W/m²) et de l'énergie restituée à l'espace (235 W/m²)

C) Explication détaillée du bilan des transferts d'énergie et de l'effet de serre

C-1) Bilan de la partie figurée en jaune sur le schéma :

(1) Rayonnement solaire incident	342 W/m ²
(2) Rayonnement réfléchi	
par l'atmosphère + nuages	77 W/m ²
par la surface des sols	30 W/m ²
Total	107 W/m ²
(3) Rayonnement absorbé	
par l'atmosphère + nuages	67 W/m ²
par la surface des sols	168 W/m ²
Total	235 W/m ²

Pour cette partie « jaune » le bilan est équilibré, l'énergie absorbée par l'atmosphère et les sols (235 W/m²) est bien égale à l'énergie incidente (342 W/m²) de laquelle est retranchée l'énergie directement réfléchi par les sols et l'atmosphère (107 W/m²).

C-2) Les transferts d'énergie entre l'espace d'une part, l'atmosphère et les sols d'autre part :

atmosphère et nuages	énergie absorbée	énergie réémise	écart
	67 W/m ²	(165 + 30) W/m ²	+128 W/m ²

les sols	énergie absorbée	énergie réémise	écart
	168 W/m ²	40 W/m ²	-128 W/m ²

Bilan total : atmosphère, nuages et sols	énergie absorbée	énergie réémise	écart
	235 W/m ²	235 W/m ²	0 W/m ²

On constate que le total de l'énergie réémise vers l'espace (235 W/m²) est bien égal au total de l'énergie absorbée par l'atmosphère et les sols. L'atmosphère réémet directement vers l'espace plus d'énergie qu'elle n'en absorbe (écart + 128W/m²) tandis que les sols réémettent vers l'atmosphère moins d'énergie qu'ils n'en reçoivent (écart -128 W/m²)

3) Pouvoir de réchauffement global (PRG) de certains groupes de gaz à effet de serre

Gaz	Formule	PRG relatifs des principales familles de gaz à effet de serre		
		PRG relatif à 20 ans	PRG relatif à 100 ans	PRG relatif à 500 ans
Dioxyde de carbone	CO ₂	1	1	1
Méthane	CH ₄	62	23	7
Protoxyde d'azote	N ₂ O	275	296	156
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	40 à 9 400	12 à 12 000	4 à 10 000
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	3 900 à 8 000	5 700 à 11 900	8 900 à 18 000
Chlorofluorocarbures	C _n Cl _m F _p	4 900 à 10 200	4 600 à 14 000	1 600 à 16 300
Hexafluorure de soufre	SF ₆	15 100	22 200	37 400

C-3) Energie émise par les sols vers l'atmosphère (partie rouge entre les sols et l'atmosphère)

Les émissions infrarouges des sols vers l'atmosphère se répartissent de la manière suivante :
 Rayonnement de surface : 390 W/m²
 Evapotranspiration : 78 W/m²
 Chaleur sensible (géothermique, anthropique...): 24 W/m²
Total : 492 W/m²

D) Au total les sols émettent 492 W/m² sous forme de rayonnement infrarouge (point C-3) Parmi ces 492 W/m² émis par les sols, 128 W/m² sont captés par l'atmosphère et participent aux 195 W/m² (165 + 30) que l'atmosphère réémet vers l'espace (point C-2). La différence entre le rayonnement infrarouge total (492 W/m²) émis par les sols et les 128 W/m² captés par l'atmosphère et réémis vers l'espace, soit **324 W/m² sont renvoyés par l'atmosphère vers le sol** (flèche rouge à la droite de la figure 2).

On appelle effet de serre ce flux d'énergie très important, 324 W/m², qui circule entre les sols et l'atmosphère.

Il a pour effet d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère et des sols de + 33 °C par rapport à la température de rayonnement de la Terre vue de l'espace, -18°C
 L'amplitude de cet effet est fonction de la composition de l'atmosphère terrestre, de sa teneur en gaz à effet de serre et en aérosols.
 Au cours des ères géologiques la composition de l'atmosphère a considérablement varié entraînant de très importantes variations de l'effet de serre et, de manière concomitante, des climats passant alternativement de périodes de glaciation plus ou moins marquées à des périodes de climat tempéré ou chaud.

2-3 LE PROCESSUS GLOBAL DE L'EFFET DE SERRE

Dans les basses couches de l'atmosphère, là où la pression atmosphérique et la concentration en gaz à effet de serre sont les plus fortes, il a été montré que l'interaction permanente entre le rayonnement infrarouge et les « grosses » molécules gazeuses de l'atmosphère est un processus qui « emprisonne » le rayonnement infrarouge (ou la chaleur) au sein de l'atmosphère et que ce phénomène est à l'origine de l'effet de serre. Il a également été montré qu'au sein de l'atmosphère les réémissions des photons infrarouges par les grosses molécules s'effectue de manière uniforme dans toutes les directions (rayonnement isotrope) c'est-à-dire pour moitié plutôt vers le sol et pour l'autre moitié plutôt vers les couches supérieures de l'atmosphère. Ce processus itératif se répète pour chaque couche de l'atmosphère. Chaque couche absorbant puis réémettant un rayonnement infrarouge. Cependant, avec l'altitude, les couches de l'atmosphère deviennent de moins en moins denses et de ce fait de plus en plus transparentes aux infrarouges. De moins en moins absorbés au fur et à mesure qu'ils parviennent à s'élever, les infrarouges sont de moins en moins renvoyés vers le bas et finissent par s'échapper vers l'espace... le miracle est qu'à la longue ils y parviennent tous ! Sans cette échappatoire la vie sur Terre serait impossible.

3) Les gaz à effet de serre

3-1 QUELQUES DÉFINITIONS RELATIVES À L'EFFET DE SERRE

- Le « forçage radiatif ». Le forçage radiatif est le supplément d'énergie renvoyé vers le sol sous forme de rayonnement infrarouge par une certaine quantité de gaz à effet de serre, il s'exprime en W/m². Par exemple le forçage radiatif dû au gaz carbonique anthropique émis par l'activité humaine depuis le début de l'ère industrielle (soit 500 milliards de tonnes de CO₂) est évalué aujourd'hui à 1,5 W/m².

- Le « pouvoir de réchauffement global ». Pour différentes raisons la quantité d'un gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère va diminuer dans le temps, plus ou moins rapidement selon le processus de destruction de ce gaz. Selon sa nature, la durée de la présence et de l'influence d'un gaz dans l'atmosphère peut varier de quelques années à plusieurs siècles.

- Le « pouvoir de réchauffement global ». Le « pouvoir de réchauffement global » que l'on attribue à une quantité de gaz à effet de serre s'obtient en cumulant le forçage radiatif que cette quantité (ou ce qui en reste) génère 20 ans, 100 ans ou 500 ans après qu'elle a été émise. Afin de faciliter les calculs (à défaut de faciliter la compréhension !), le pouvoir de réchauffement d'un gaz (le PRG) est évalué relativement au pouvoir du gaz carbonique. Arbitrairement le pouvoir de réchauffement global du gaz carbonique est pris égal à 1 pour chaque période de référence 20, 100 ou 500 ans.

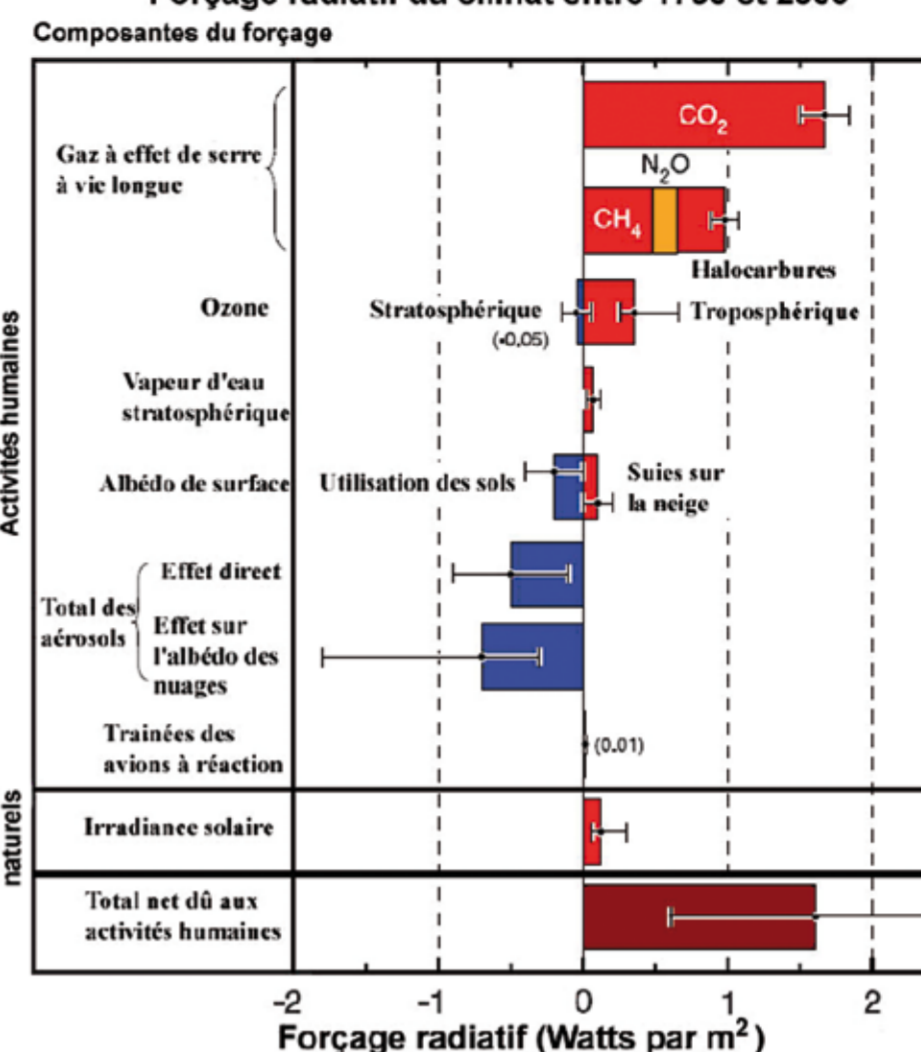
Par exemple (figure 3), 20 ans après son émission, le PRG relatif du N₂O est égal à 275, cela signifie que dans 20 ans l'impact sur le climat d'une quantité de protoxyde d'azote émise aujourd'hui sera 275 fois plus élevé que l'impact de la même quantité de CO₂ également émise le même jour.

3) Pouvoir de réchauffement global (PRG) de certains groupes de gaz à effet de serre

3-2 LE FORÇAGE RADIATIF

A partir de la concentration des différents gaz à effet de serre, et de leur pouvoir de réchauffement global, il est possible de calculer la participation de chaque gaz à effet de serre au supplément d'énergie renvoyé vers le sol (au forçage radiatif). On obtient le tableau de la figure 4. Certains gaz augmentent le forçage radiatif, le gaz carbonique, le méthane ainsi que les halocarbures contenant du chlore, du fluor ou du soufre. Par contre, du fait de leur pouvoir réfléchissant, les aérosols ont tendance à diminuer le forçage radiatif en augmentant le pouvoir réfléchissant de l'atmosphère (augmentation de l'albédo de l'atmosphère)

Forçage radiatif du climat entre 1750 et 2005



4 Forçage radiatif des principaux gaz à effet de serre (hors vapeur d'eau)

4) Bref historique de la prise en compte de l'effet de serre

4-1 MODÉLISATION DE L'EFFET DE SERRE ET DU CLIMAT

L'effet de serre a été pressenti dès la seconde moitié du 18^{ème} siècle pour expliquer l'écart de température existant entre le sommet des montagnes et les vallées. Il est correctement identifié en 1824 par Jean Baptiste Fourier
 En 1838, Claude Pouillet identifie le CO₂ et la vapeur d'eau comme étant des gaz à effet de serre.
 En 1896 Svant Arrhenius calcule l'effet sur le climat d'une variation de la concentration en CO₂ et prédit un réchauffement de la planète suite à l'utilisation intensive du charbon. Un réchauffement qu'il considère alors comme bénéfique permettant d'augmenter les surfaces cultivables et la production agricole... Les vérités évoluent !
 En 1995 Hans Suess met en évidence l'appauvrissement de l'atmosphère en carbone 14 radioactif. Cet appauvrissement relatif en carbone 14 est la preuve que l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère provient bien du carbone fossile contenu dans le charbon, le pétrole ou le gaz naturel et non du bombardement de l'atmosphère par les rayons cosmiques.

Explication :
 a) le carbone radioactif provient de l'interaction entre les molécules d'azote de l'atmosphère avec le rayonnement cosmique. Il s'en forme en permanence autant qu'il s'en désintègre, on le

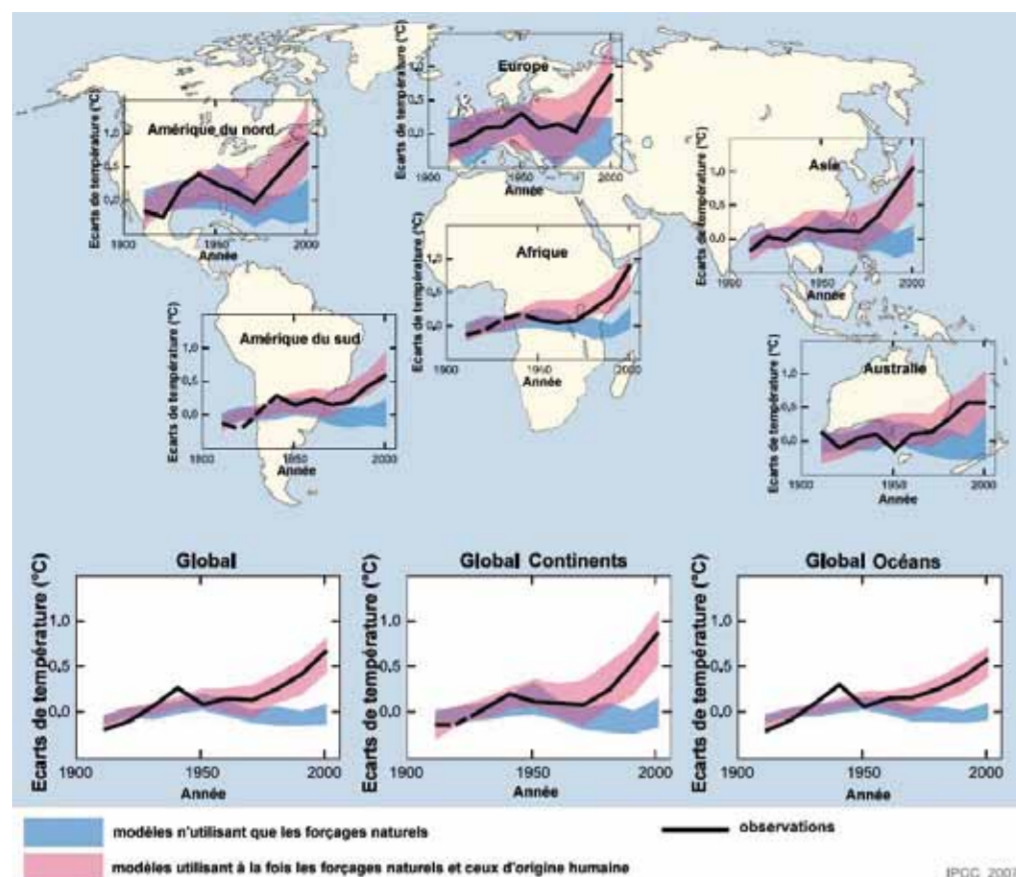
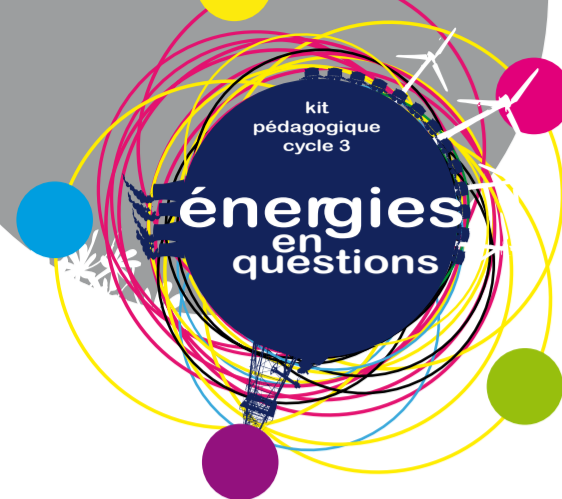
retrouve dans tous les tissus vivants du monde végétal et animal,
 b) bien que les hydrocarbures et les charbons soient d'origine végétale, le carbone radioactif qu'ils contenaient à l'origine a totalement disparu depuis fort longtemps (la période du carbone 14 étant de 5 730 ans). Les hydrocarbures et les charbons ne contiennent plus de carbone 14, ils ne contiennent que les isotopes stables 12 et 13 du carbone. En les brûlant on augmente la concentration de ces isotopes stables dans l'atmosphère au détriment du carbone 14.
 - En 1957 Roger Revelle démontre que les capacités d'absorption du CO₂ par les océans ne sont pas infinies
 - En 1958, débutent les mesures systématiques du CO₂ atmosphérique dans des lieux peu perturbés par les activités humaines tels que l'Antarctique, les Iles du Pacifique, Hawaï...
 A partir des années 60, l'impact des gaz à effet de serre sur la température moyenne de la planète fait l'objet d'études systématiques.
 - En 1970, un premier modèle climatique simplifié de l'impact des gaz à effet de serre est élaboré.
 - En 1990, parution du premier rapport du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat). Ce premier rapport sera suivi des rapports de 1995, 2001 et 2007.
 - Depuis 1990, les modèles climatiques utilisés par le GIEC ont été perfectionnés et affinés.

En dehors des faits physiquement incontestables on peut cependant constater :
 - en Arctique, un recul de plus en plus important de la banquise. Le même constat est effectué sur les glaciers de tous les massifs montagneux de la planète.
 Les célèbres neiges du Kilimandjaro ont disparu, la remontée des glaciers des Alpes est spectaculaire,
 - en France, depuis quelques décennies une avancée de la date du début des vendanges, cette avancée est couramment 2 à 3 semaines.
 On pourrait ainsi multiplier à l'envi ce genre de constats. Tous semblent cependant aller dans le même sens, celui d'un réchauffement moyen de la planète.

5) Prises en compte successives des compartiments environnementaux

5) Prises en compte successives des compartiments environnementaux (Respectivement rapports GIEC 1995-2001-2007)





6 Evolution des écarts de températures depuis la première moitié du XXème siècle

4-3 LES MODÉLISATIONS ET LEUR CONFRONTATION AVEC LES RELEVÉS DE TEMPÉRATURE

Les diverses figures 6 permettent de comparer les résultats de la modélisation de l'évolution des températures.

6 Evolution des écarts de températures depuis la première moitié du XXème siècle

Jusqu'en 1970 la prise en considération du seul forçage naturel ne tenant pas compte des gaz à effet de serre d'origine anthropique (zones bleues de la figure 6) rendait correctement compte des évolutions de température réellement observées (lignes noires). A partir des années 1970, pour rendre correctement compte des mesures effectuées il est devenu nécessaire dans les modélisations de tenir compte de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre anthropiques générées par l'activité humaine. Les modélisations de température prenant en compte l'évolution de la teneur des gaz à effet de serre d'origine anthropiques (plages roses de la figure 6) sont désormais les seules à rendre correctement compte de l'évolution des températures mesurées. Si, au contraire, à partir des années 1970 on ne tient pas compte des émissions anthropiques, les simulations que l'on obtient (zones bleues) s'écartent de manière de plus en plus significative des températures mesurées (lignes noires).

4-4 LES PROJECTIONS POUR LE XXIÈME SIÈCLE

Les projections auxquelles il peut être fait référence émanent d'organismes dépendant de l'Organisation des Nations Unies tels le GIEC ou la Banque mondiale.

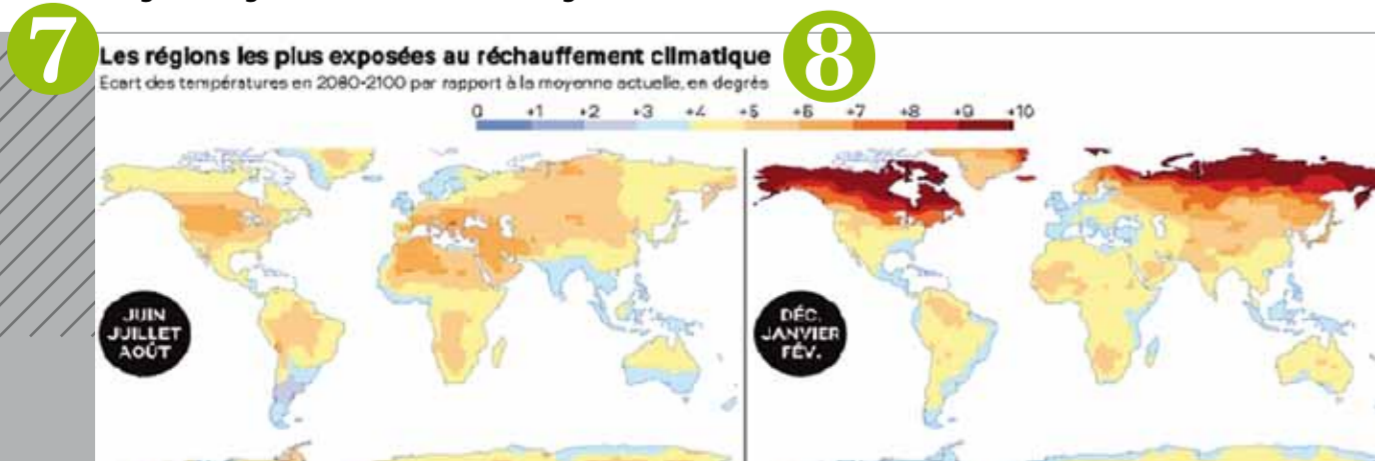
Les figures 7 et 8, publiée en novembre 2012 par la Banque Mondiale, résultent d'une simulation donnant les écarts entre les températures moyennes actuelles et celles que l'on mesurerait en 2080-2100 si aucune inflexion n'était apportée à la consommation actuelle des énergies fossiles carbonées.

L'évolution serait particulièrement importante en été (figure 7), avec des vagues de chaleur extrême, dans les zones continentales, tropicales et subtropicales, en Amérique du Nord, en Russie... Des évolutions beaucoup plus importantes encore en hiver (figure 8) dans les zones septentrionales, Océan Arctique, Grand Nord Canadien et Sibérie. L'écart pouvant atteindre jusqu'à 10°C. L'évolution serait de 4°C à 6°C en moyenne dans nos régions d'Europe occidentale.

A cette échéance la Banque mondiale estime que 44% des surfaces agricoles mondiales pourraient être affectées par des sécheresses chroniques (contre 15% en 2012), et que 43% de la population serait confrontée au manque d'eau (28% en 2012).

La fonte des glaciers de l'Antarctique et du Groenland ainsi que l'augmentation de la température des eaux des océans provoquant leur dilatation seraient à l'origine d'une augmentation de leur niveau moyen de 0,5 à 1 mètre. Les répercussions de tels bouleversements seraient de nature à engendrer de vastes mouvements de population et donc une instabilité et une insécurité au niveau mondial. Les petits pays insulaires seraient incapables d'assurer la survie de leur population.

Variation en °C des températures en 2080-2100 par rapport aux températures moyennes actuelles
Figure 7, à gauche, les écarts en été, figure 8, à droite, les écarts en hiver



Le gaz carbonique, émissions et séquestration



L'évolution des émissions de gaz à effet de serre vue par Mix et Remix, Courier International

1) Les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère

Les émissions mondiales annuelles de gaz carbonique (dioxyde de carbone) liées à la combustion des combustibles fossiles oscillent actuellement entre 32 et 35 milliards de tonnes (36 milliards pour les émissions de 2010), soit une hausse de 40 % par rapport aux émissions de 1990 prises comme référence par le protocole de Kyoto pour fixer les objectifs à atteindre en matière de limitation des rejets de gaz à effet de serre. Durant l'année 2010, en Chine et en Inde, les émissions ont progressé respectivement de 10,4% et de 9,4%.

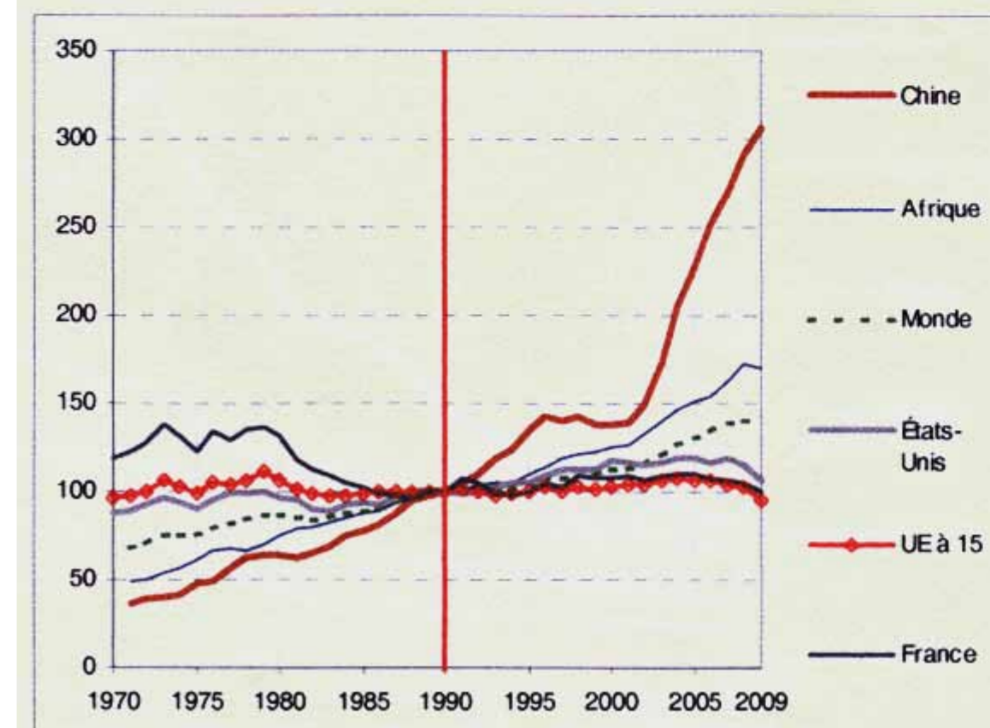
1 Pollution sud-est asiatique et photo satellite

Elles ont en moyenne progressé de 7,6% dans les pays émergents, peu évolué voire légèrement régressé, dans les pays de l'OCDE mais globalement elles n'ont pas cessé d'augmenter régulièrement au niveau mondial.

2 Variation des émissions de CO2 en référence à celles émises en 1990

Ce constat brutal demande cependant à être corrigé et relativisé car il serait trop aisé de jeter l'opprobre sur les pays émergents en oubliant de souligner que les pays développés de l'OCDE, dont beaucoup se qualifient de vert tueux,

Émissions de CO2 dans le monde
Indice base 100 en 1990



Source : Agence internationale de l'énergie (AIE), 2011

2 Variation des émissions de CO2 en référence à celles émises en 1990, AIE 2011

« externalisent » ou « délocalisent » une partie importante de leurs émissions vers les pays émergents via leurs implantations industrielles généralement les plus polluantes. Les émissions mondiales proviennent en premier lieu, et pour 55%, des industries lourdes. Elles se répartissent entre la production d'électricité à partir du charbon et du gaz qui représente à elle seule 38% du total des émissions, suivie des industries du ciment (8%), du pétrole et du gaz (7%) et de la sidérurgie (3%).

En comparaison, en France, tous secteurs confondus, les émissions annuelles de dioxyde de carbone s'élèvent à 390 millions de tonnes soit 1% des émissions mondiales soit un peu moins de 6 tonnes par an et par habitant. Elles se répartissent entre les transports (38%), le résidentiel et le tertiaire (26%), l'industrie et l'agriculture (21%), la production d'électricité (8%) et d'autres sources d'émission 6% (dont la branche énergie, transformation, raffineries...).

2) Les émissions de dioxyde de carbone : une tendance constante à la hausse

De 1980 à 2009, la demande mondiale d'énergie primaire est passée de 7 milliards de tonnes équivalent pétrole (tep) à 12 milliards de tep. 81% de l'énergie primaire sont issus des ressources fossiles carbonées, pétrole, gaz et charbon.

Cette croissance de la demande se perpétuera compte tenu de l'immense inertie rencontrée lorsqu'il s'agit, soit de modifier les modes de vie, soit de rénover des parcs industriels de production existants dont les durées de vie se comptent en décennies, soit de rénover des parcs de logements dont la durée de vie est encore plus importante.

Dans cet esprit il faut souligner que 75 % des rejets de gaz à effet de serre qui interviendront en 2035 proviendront d'installations existantes ou en cours de construction ! L'Agence internationale de l'énergie (l'AIE) prévoit qu'en 2035 la demande d'énergie primaire passera de 12 à 18 milliards de tep, soit une augmentation de 50 % entre 2009 et 2035. Selon ses prévisions, les énergies fossiles représenteront toujours 80 % de la consommation d'énergie primaire, ce qui signifie que les rejets de CO2 augmenteraient inéluctablement dans les mêmes proportions. Ces perspectives sont d'autant plus sombres qu'en période de crise et de stagnation de l'activité économique il est à craindre que les contraintes économiques, la compétition internationale devenant de plus en plus rude et les contraintes sociales (destruction d'emplois et chômage) l'emportent devant celles liées à l'environnement. C'est ce que tend à traduire un désengagement plus ou moins marqué selon les pays vis-à-vis des orientations initialement fixées par les sommets de Rio ou de Kyoto.

+ Pour en savoir plus
Le lien existant entre l'activité économique et les émissions de CO2

Un nouvel élément expliquant en partie le relâchement vis-à-vis des préoccupations environnementales est apparu depuis les premiers sommets de Rio et de Kyoto, il s'agit de l'espoir né des récentes mises en exploitation des réserves non conventionnelles d'énergie fossile. Ces nouveaux Eldorado que sont les gisements de gaz de schiste, de sables bitumineux ou d'huiles lourdes et extra lourdes changent la physionomie de l'approvisionnement énergétique de la planète. Ces ressources, souvent localisées dans le sous-sol des principaux pays consommateurs (USA, Canada, Chine...) qui les exploitent de plus en plus intensivement, ont éloigné le spectre de la pénurie et font oublier les priorités des années 1990-2000 : la modération de la consommation d'énergie, notamment de l'énergie primaire carbonée, et la diminution des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

L'exploitation de ces nouvelles ressources contribue également à reléguer au second plan les motivations d'ordre environnemental d'autant qu'elles permettent la relocalisation d'industries lourdes (par exemple la sidérurgie et la chimie aux USA) et, par conséquent, la création de nombreux emplois dans des pays touchés par le chômage,

3) Les solutions proposées: captage et séquestration

Le captage du CO2 issu de la combustion des énergies fossiles carbonées suivi de la séquestration de ce gaz en site géologique profond est une solution souvent avancée.

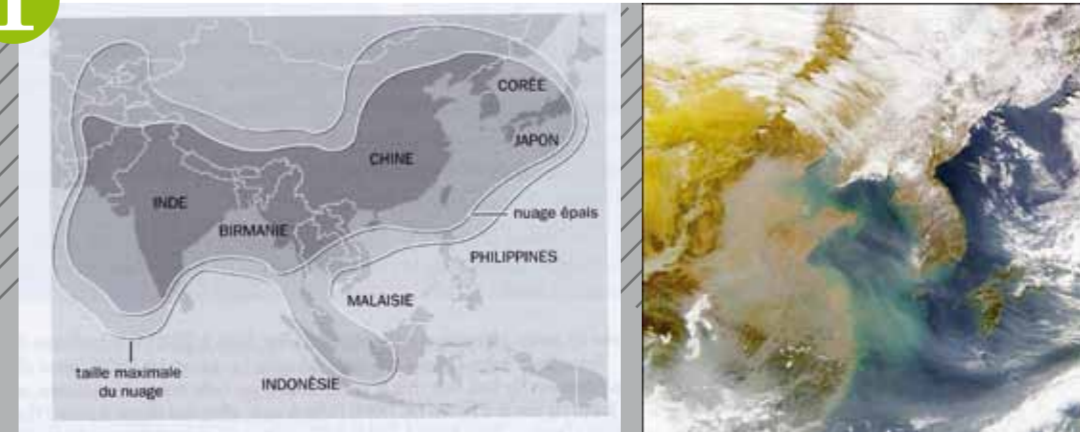
Bien qu'elle ne soit pas à négliger, en l'état actuel des connaissances elle ne saurait à elle seule résoudre l'énorme problème posé par l'émission annuelle de 35 milliards de tonnes de CO2, dont seule une petite moitié peut être absorbée par la biomasse et par les océans, l'autre moitié participant à l'augmentation inéluctable et régulière de la teneur en CO2 de l'atmosphère.

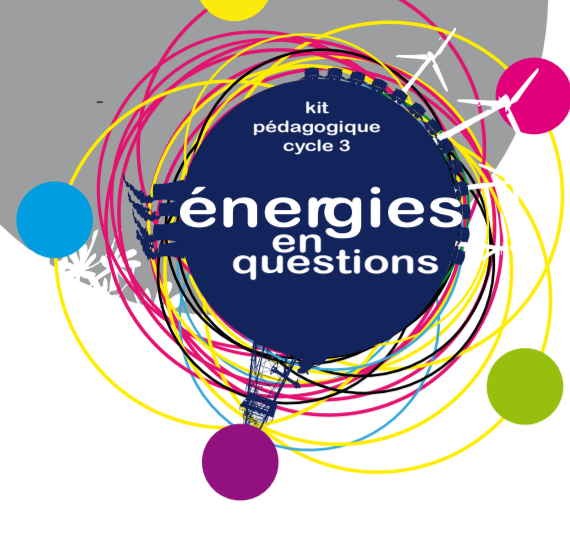
Il est clair que, mise à part une réduction drastique du recours aux énergies fossiles carbonées, il n'existe pas de solution réellement efficace et pérenne qui permettrait, à l'échelle de la planète, d'infléchir la tendance actuelle et de maintenir la concentration en CO2 de l'atmosphère en dessous de 450 parties par million (ppm) pour la fin du siècle. Cette concentration de 450 ppm est la limite qu'il conviendrait de s'imposer afin d'éviter un réchauffement excessif, supérieur à 2°C, de la planète par effet de serre (voir le chapitre « Effet de serre »). Tâche ardue sachant que la concentration du CO2 dans l'atmosphère est déjà de 390 ppm et que celle-ci s'accroît de 2 ppm par an... L'atteinte d'une concentration de 450 ppm c'est donc pour dans 30 ans, c'est-à-dire pour demain à l'échelle de l'évolution possible et humainement soutenable des modes de vie d'une société.

3-1 LE CAPTAGE DU CO2

Les techniques de captage, de transport et de stockage du CO2 par injection dans le sous-sol sont des techniques éprouvées et largement utilisées par l'industrie pétrolière. Le captage permet, avant la commercialisation du gaz et du pétrole, de les purifier en extrayant le gaz carbonique et les autres gaz indésirables qu'ils contiennent à la sortie du gisement.

1 Pollution sud-est asiatique **Photo satellite du nuage de pollution Chine / Corée du Sud**





L'indicateur le plus significatif et le plus intéressant pour juger de l'impact environnemental des politiques énergétiques et des différents systèmes de production est celui donnant, pour chaque pays ou région du monde, **le tonnage de CO₂ émis pour produire une quantité déterminée de biens** (quantité exprimés en valeur marchande, en million de \$). L'indicateur est significatif non seulement de la quantité d'énergie primaire utilisée pour produire ces biens mais également de la nature de cette énergie selon qu'elle est peu ou fortement carbonée. La figure 2 indique, pour différentes régions ou pays, le tonnage du CO₂ émis par million de dollars (par point de PIB) de biens produits ou de service rendus.

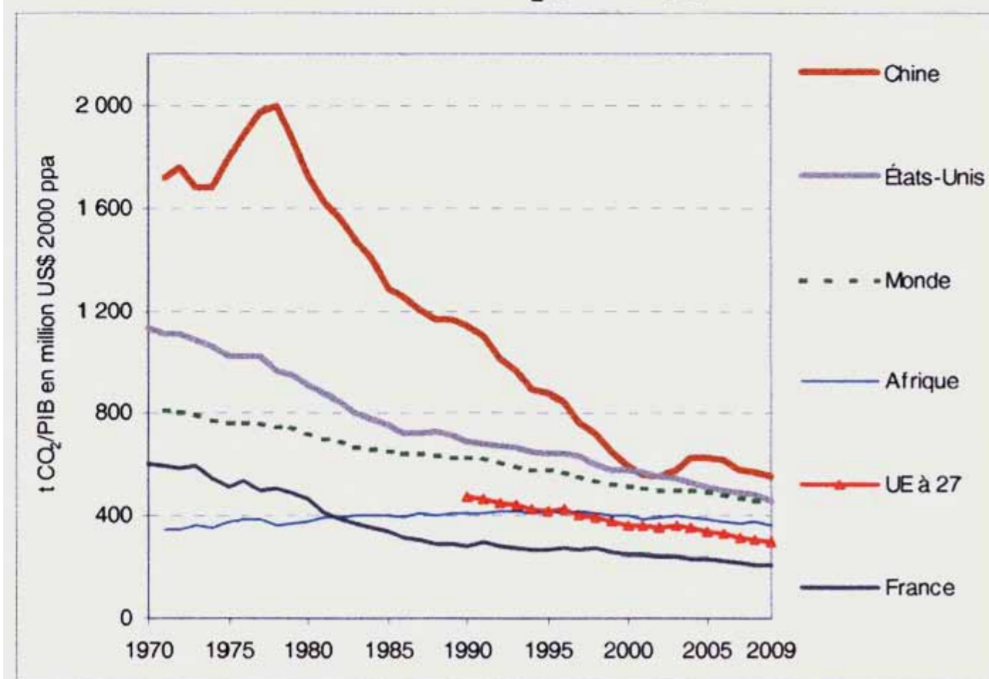
2 Tonnage de CO₂ émis par million de \$ de biens produits

Au niveau mondial, la France occupe la seconde place derrière la Suède parmi les pays ayant les plus faibles émissions de CO₂ par point de PIB avec 208 tonnes. A titre indicatif, par point de PIB, les émissions sont de 298 tonnes pour l'ensemble de l'Union européenne, dont 334 pour l'Allemagne, 290 pour l'Espagne, 280 pour l'Italie et le Royaume Uni. Hors de l'Union européenne les émissions sont de : 1002 tonnes pour la Russie, 553 tonnes pour la Chine, 457 tonnes pour les USA, 347 tonnes pour l'Inde. On remarquera qu'en 40 ans, à production de biens équivalente, les émissions de CO₂ par l'industrie ont fortement décroché de par le monde, y compris dans les pays émettant le plus, le cas de la Chine étant particulièrement frappant.



Le lien existant entre l'activité économique et les émissions de CO₂

Intensité d'émission de CO₂ par rapport au PIB



Lecture : en 1978, la Chine a émis 2 000 tonnes de CO₂ pour chaque million de US\$ de PIB produit.

Source : AIE, 2011 (données non corrigées des variations climatiques)



Tonnage de CO₂ émis par million de \$ de biens produits

Bien que jusqu'à présent le CO₂ capté soit rejeté à l'atmosphère, l'industrie pétrolière possède des techniques opérationnelles de captage, de réinjection et de stockage du gaz carbonique dans les formations géologiques profondes. Ces techniques sont essentiellement mises en œuvre lors des opérations de « récupération assistée » qui consistent, lorsque la récupération présente un intérêt économique, à injecter un gaz (ou de l'eau) dans un gisement en déclin afin de le réactiver et d'en extraire (partiellement) le pétrole ou le gaz qu'il renferme encore.

Trois techniques sont en compétition : le captage après combustion, l'oxycombustion et la décarbonatation (la fabrication d'hydrogène).

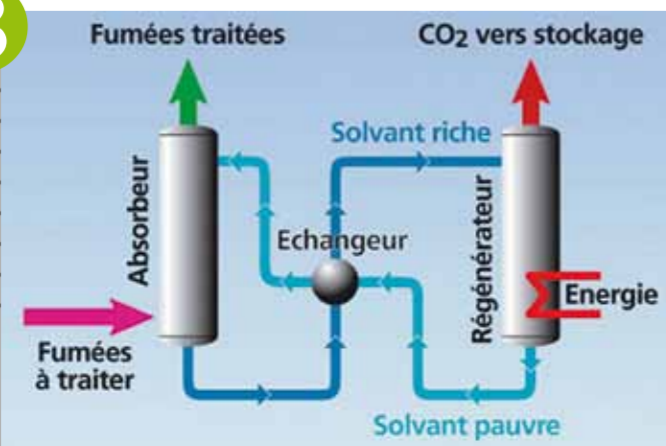
a) Le captage après combustion.

Dans une combustion classique utilisant l'air (80% d'azote, 20% d'oxygène) comme comburant, outre le CO₂ résultant de la combustion, les fumées contiennent une quantité importante d'autres gaz, évidemment 80% d'azote, l'oxygène n'ayant pas participé à la combustion, des poussières, des suies et divers autres gaz indésirables (gaz sulfureux, protoxyde d'azote...). Capter le CO₂ et les autres gaz toxiques ou à effet de serre dans les fumées d'une chaudière nécessite une suite d'opérations complexes de séparation et le traitement de quantités considérables de fumées, couramment plusieurs dizaines de m³ par seconde dans une centrale thermique.

Le principe du captage après combustion (figure 3) consiste, après refroidissement des fumées, à « lessiver » celles-ci à l'aide de solvants (amines ou ammoniac) présentant une grande affinité pour le CO₂.

3 Principe de la captation du CO₂ dans les fumées par solvant

Principe de la captation du CO₂ dans les fumées par solvant



Le lessivage s'effectue dans d'immenses tours appelées « absorbeurs » à l'intérieur desquelles environ 90 % du CO₂ présent dans les fumées se combinent au solvant, les 10% résiduels étant rejetés à l'atmosphère avec les fumées traitées. Le complexe formé par le CO₂ et les amines, le « solvant riche », est ensuite dirigé vers un « régénérateur » où les liaisons chimiques du complexe sont rompues par chauffage libérant le CO₂ qui est capté en vue de sa séquestration. Le solvant est pour sa part régénéré et renvoyé vers les absorbeurs pour amorcer un nouveau cycle de captage. Ce procédé est un important consommateur d'énergie, entre 10 et 20 % de l'énergie produite par la chaudière y sont consacrés.

b) L'oxycombustion.

Afin de limiter au maximum le volume des gaz de combustion et éviter d'avoir à séparer le CO₂ des 80% d'azote contenus dans les fumées, comme dans une combustion à l'air, le comburant utilisé pour l'oxycombustion est l'oxygène. Ainsi, après combustion, les gaz obtenus ne contiennent pratiquement que du gaz carbonique. Pour des raisons de sécurité, et afin d'atténuer la vivacité de la combustion (avec de l'oxygène pur elle serait explosive !), la combustion s'effectue avec un mélange d'oxygène et de gaz carbonique recyclé provenant de la combustion elle-même. La consommation d'énergie du procédé provient de la nécessité de produire de l'oxygène par distillation fractionnée cryogénique.

c) La décarbonatation préalable, la production d'hydrogène.

Ce procédé concerne essentiellement le charbon. A partir de charbon, et par la voie chimique, l'objectif est d'obtenir un carburant ne contenant pas de carbone, autrement dit de produire de l'hydrogène. Schématiquement, à partir de charbon, le procédé consiste, à haute température et en présence d'eau, à obtenir par « vaporeformage » un gaz de

synthèse qui est par la suite introduit dans un réacteur chimique. En sortie de ce réacteur on obtient de l'hydrogène et du gaz carbonique que l'on capte. L'hydrogène peut être utilisé comme combustible dans une pile à combustible, le gaz résultant de sa combustion étant seulement de la vapeur d'eau. Le procédé est coûteux et consomme une grande quantité d'énergie, celle nécessaire à la dissociation des molécules d'eau pour produire l'hydrogène. Énergie que l'on récupère (au rendement près du procédé) en brûlant l'hydrogène pour produire... de l'eau !

3-2 LA SÉQUESTRATION (OU STOCKAGE) DU CO₂

Plusieurs types de stockage sont envisageables, nous évoquerons rapidement que les deux premiers :

3-2-1 La minéralisation et le stockage océanique.

a) La minéralisation. Elle consiste à former un carbonate à partir de composés basiques, chaux, magnésie... on obtient ainsi du calcaire, de la dolomite... Les procédés sont lents, coûteux et totalement inadaptés aux énormes quantités de CO₂ à traiter.

b) Le stockage océanique. Ce procédé conduirait à une aggravation totalement inacceptable de l'acidification des océans. Le procédé est absolument à proscrire.

3-2-2 Le stockage géologique profond.

Le troisième type de stockage apparaît comme étant le seul procédé réellement adapté au stockage de quantités importantes de CO₂. Il est à noter que des formations géologiques profondes naturelles renfermant du CO₂ existent, par exemple celle de Montmirail dans la Drôme. Les formations géologiques susceptibles de recevoir un stockage sont, par ordre croissant d'intérêt :

- les veines de charbon inaccessibles ou inexploitable.
- les gisements de pétrole.

En stimulant la récupération assistée d'un gisement sur le déclin par l'injection de CO₂ il est possible de rentabiliser l'opération de séquestration. Cependant, ces gisements ayant généralement été criblés de forages pendant leur prospection et leur exploitation, leur étanchéité sur le long terme reste à prouver au cas par cas. Ce type de séquestration en gisement ancien nécessitera une surveillance plus importante que les autres modes de stockage géologique et sera plus difficilement acceptable par le public. Par ailleurs les gisements les plus importants et les plus intéressants (Moyen Orient, off-shore...) étant souvent assez éloignés des grands centres industriels émetteurs de CO₂, ils nécessitent un transport du gaz sur de longues distances.

- les bassins sédimentaires et les aquifères salins profonds (plus de 800m)

Les bassins sédimentaires comportent généralement en profondeur des roches réservoirs dont les pores sont occupés par des eaux chargées de sels, ce qui rend ces eaux impropres à la consom-

mation. Les avantages des aquifères salins par rapport aux autres sites de séquestration sont nombreux :

- de par le monde, il existe un grand nombre de bassins sédimentaires, il s'en trouve donc assez facilement à proximité des grands centres industriels. En général, leur extension est importante, à minima ils occupent une région,
- du point de vue géologique les bassins sont assez bien connus, la plupart d'entre eux ayant déjà fait l'objet d'études géologiques assez fines dans le cadre de la recherche pétrolière,
- du point de vue de la sécurité du stockage, le CO₂ se dissout et reste piégé. Dans certaines configurations il peut même à la longue se fixer par minéralisation,
- la stabilité géologique et sismique des bassins sédimentaire est très généralement une assurance quant à la pérennité du confinement du gaz injecté.

La capacité mondiale de stockage offerte par les aquifères salins est beaucoup plus importante que celles offertes par les autres types de stockage. Le GIEC les estime à plus de 2 000 milliards de tonnes (des estimations plus optimistes les évaluent à 10 000 milliards de tonnes). Il ne sera évidemment pas possible de séquestrer l'ensemble du CO₂ émis. Selon des estimations récentes il serait possible de stocker 20% de la production mondiale soit de 6 à 7 milliards de tonnes par an, à condition d'accepter un surcoût très important de l'énergie (voir le en savoir plus sur l'impact économique de la séquestration) et à condition que les populations voisines du site de stockage en acceptent la présence et les éventuelles nuisances.

3-3 LE TRANSPORT DU DIOXYDE DE CARBONE

Les solutions de transport couramment envisagées entre le lieu de captage et le lieu de séquestration sont le transport par canalisation sur des distances pouvant atteindre quelques milliers de kilomètres et le transport par bateau du type méthanier. Le CO₂ est généralement transporté par gazoduc sous une forme supercritique. Les solutions de transport sont connues et éprouvées. Cependant le CO₂ capté dans les fumées de combustion n'est pas pur, il contient de l'eau, des oxydes d'azote et de soufre... formant un gaz assez corrosif qui nécessite pour son transport l'emploi de matériaux spécifiques résistant à ce type particulier de corrosion.

4) Les limites actuelles au développement de la captation et de la séquestration du CO₂

En préliminaire, soulignons que la séquestration des gaz à effet de serre, essentiellement le CO₂, n'est envisageable que pour des installations industrielles importantes et fixes. La mobilité des moyens de transport, la taille de la petite industrie et l'éparpillement de l'habitat ne permettent pas d'envisager, en l'état actuel de la technologie, la séquestration de leurs émissions de gaz. On estime qu'à partir de 2030, au mieux, 20 % des émissions pourraient être captées, ce qui serait notablement insuffisant pour atteindre le résultat souhaité (un réchauffement moyen limité, inférieur à 2 °C à l'échelle du siècle)

4-1 LE POINT DE VUE ÉCONOMIQUE

L'industrie lourde ainsi que le secteur de l'énergie (la production d'électricité à partir de charbon, de gaz ou de fioul et le raffinage) représentent 55% des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Le principal obstacle au développement de la captation et de la séquestration de ces gaz émis par ces industries est d'ordre économique. L'ensemble des opérations conduisant à la séquestration représente un surcoût de production important alors que le coût auquel il est encore aujourd'hui possible (et accepté !) de rejeter le CO₂ dans l'atmosphère est nul ou peu s'en faut... y compris en Europe. Il n'y a donc actuellement aucune incitation économique réelle à s'engager dans la voie onéreuse de la séquestration (voir le « Savoir plus » sur les coûts de la séquestration et sur les quotas d'émission).

La concurrence acharnée que se livrent les Etats sur le plan commercial et le refus catégorique des plus gros émetteurs de CO₂ (Chine, USA, Russie...) d'avoir à payer un droit à émettre (la « taxe carbone ») ne laissent pas présager de la conclusion prochaine d'un accord global international sur les émissions de gaz à effet de serre et sur la séquestration.

4-2 LE COÛT DE LA SÉQUESTRATION

Selon le procédé utilisé et le site de séquestration disponible, le coût global incluant le captage, le transport et l'injection du CO₂ dans un site géologique profond varie de 35 à 90 € par tonne de CO₂. On appelle « tonne de CO₂ évitée » toute tonne de CO₂ captée et séquestrée dont le rejet a été évité. Cette évaluation est issue d'un rapport d'août 2012 publié par le Comité d'analyse stratégique dépendant du Premier Ministre. L'évaluation du Bureau de Recherche Géologique et Minière (le BRGM) est équivalente : en moyenne 60 € par tonne de CO₂ évitée.

Le surcoût engendré par l'ensemble des opérations conduisant à la séquestration est essentiellement celui dû au captage qui contribue à hauteur de 75 à 80 % au coût global. Le coût du captage comprend l'amortissement des installations (très importantes), les frais de leur exploitation et le coût de l'énergie à dépenser pour traiter les fumées et régénérer les solvants (ou pour produire l'oxygène dans le cas de l'oxycombustion).

L'énergie consommée par le traitement des fumées entraîne une perte conséquente du rendement des installations allant, selon les cas, de 10 à 30%.

Par analogie avec les coûts de stockage souterrain de gaz naturel (méthane), le coût de stockage du CO₂ émis par une installation importante varie entre 1 et 20 € par tonne évitée en fonction de la distance séparant l'installation et le site de séquestration, en fonction du site de séquestration lui-même, selon qu'il s'agit d'un gisement d'hydrocarbure ou d'un aquifère salin, d'un site terrestre ou d'un site marin et selon l'importance du coût de la surveillance et du suivi du site à long terme.

De l'avis des économistes à l'échelle mondiale, seul un coût inférieur à 20 € la tonne de CO₂ évitée (incluant captage, transport et séquestration) permettrait un développement généralisé de la séquestration.



L'impact économique de la séquestration sur la production d'électricité

Pour comprendre les enjeux, il convient en premier lieu d'avoir une notion des quantités de CO₂ émises en fonction du mode de production de l'électricité à partir d'hydrocarbures ou de charbon. Pour les centrales thermiques brûlant soit du charbon, soit du gaz ou du fioul, les quantités de CO₂ émises sont en moyenne de :
 - 500 grammes par kWh pour les centrales les plus modernes à cycle combiné brûlant du gaz,
 - 900 à 1 300 grammes par kWh, selon leur âge, pour celles brûlant du charbon ou du lignite,
 - 1 100 grammes par kWh pour les centrales de production de pointe brûlant du fioul.

Pour mémoire, les émissions des autres moyens de production, nucléaire, hydraulique et énergies renouvelables sont de quelques grammes, de 3 à 6, par kWh. Il s'agit dans ce cas des émissions de CO₂ émises durant la construction de ces moyens de production et, pour le nucléaire, par celles qu'engendre le cycle du combustible (extraction minière et retraitement). En quantités émises annuellement, les émissions de CO₂ d'une centrale thermique d'une puissance installée de 1 000MW électriques fonctionnant en base (production annuelle 6 milliards de kWh) sont :
 - de 3 millions de tonnes de CO₂ pour les centrales brûlant du gaz,
 - de 6 à 8 millions de tonnes de CO₂ pour celles brûlant du

charbon ou du lignite. Le surcoût qu'entraînerait la séquestration du CO₂ émis par ces centrales se traduirait par une augmentation de 50% du coût de la production électrique à partir du gaz et de 77% à partir du charbon. L'importance du surcoût explique la lenteur avec laquelle se développe la séquestration du CO₂ à travers le monde. Pratiquement, hormis des installations pilote de petite taille (de l'ordre de seulement un à deux millions de tonnes séquestrées par an), les injections de CO₂ dans des sites géologiques profonds sont toujours associées à la récupération assistée d'hydrocarbures, ce qui permet d'en assurer la rentabilité.

a) Le principe du système des quotas d'émission.

Dans son principe le système des quotas d'émission de CO₂ (ou permis d'émettre) est destiné à inciter les entreprises importantes émettrices (industrie pétrolière, production d'électricité, cimenterie, papeterie et sidérurgie) à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Ce système est spécifique à l'Europe.

En 2012, il concerne environ 11 000 installations de l'Union, dont un peu plus de 1 100 sites majeurs. Les secteurs du transport, de l'agriculture et de la chimie, de même que ceux du secteur résidentiel et tertiaire sont incités à la « modération » par d'autres mesures, par exemple d'ordre fiscal. Ces secteurs ne sont donc pas concernés par le système des quotas.

b) Le fonctionnement du système des quotas.

Chaque état de l'Union fixe, avec l'aval de la Commission européenne, les quotas (autorisations ou permis) d'émission qu'il accorde à ses entreprises. Une entreprise soumise à ce système effectue ses rejets de gaz dans l'atmosphère dans la limite du quota qui lui a été alloué. Jusqu'à la fin 2012, correspondant à l'expiration du protocole de Kyoto, les quotas sont alloués gratuitement. Les quotas étant alloués gratuitement, comment le système peut-il inciter les entreprises à réduire leurs émissions ? L'incitation repose sur l'échange de quotas de la manière suivante : les entreprises qui dépassent leur quota sont dans l'obligation « d'acheter » des droits supplémentaires à émettre, d'acheter des droits qui n'ont pas été utilisés par d'autres. Ces droits inutilisés ont été remis à la disposition d'un système d'échange par les entreprises qui n'atteignent plus leur quota grâce aux progrès qu'elles ont réalisés ou qui ne les atteignent pas... parce qu'on leur en avait trop octroyés ! A cet effet une bourse d'échange des quotas a été créée, Powernext (racheté par NYSE-Euronext à partir de 2007)

c) Les biais du système d'échange des quotas.

Le système des quotas d'émission de CO₂ a été mis en place en 2005. Pour sa phase de lancement, entre 2005 et 2007, le volume des quotas avait été fixé par les états à partir des déclarations fournies par les industriels



Le système des quotas d'émission de CO₂ (permis d'émission)

4-3 LA SÉCURITÉ ET L'ACCEPTABILITÉ DE LA SÉQUESTRATION

La sécurité

La sécurité de la séquestration repose sur l'étanchéité et la pérennité de la formation géologique retenue. En faible dose, le gaz carbonique par lui-même n'est pas un toxique. Nous en produisons par la combustion des sucres contenus dans la nourriture que nous absorbons, nous le rejetons lorsque nous respirons ! Par contre sa concentration dans l'air devient dangereuse lorsqu'elle dépasse 4% et mortelle (par anoxie) lorsqu'elle atteint et dépasse 10%.

Le gaz carbonique étant plus dense que l'air, il a tendance à s'accumuler et à stagner dans les points bas (les fonds de cuves ou de réservoirs, les sous-sols, les chais, les vallées...) créant une chape de gaz pouvant être à l'origine d'accidents. Le risque d'asphyxie par le CO₂ est bien connu des vigneronniers au moment de la fermentation du raisin dans les cuves des chais.

Pour le stockage, des études géologiques poussées sont donc indispensables afin de s'assurer

indiquant le volume des émissions de CO₂ qu'ils avaient effectuées en 2004.

Il est rapidement apparu que ces déclarations avaient souvent été surevaluées, les volumes déclarés ayant été globalement supérieurs de 12% à ceux réellement effectués. Il n'est donc guère surprenant de constater que très peu d'entreprises ont dépassé leur quota durant cette période 2005-2007 ! A la bourse d'échange il en est résulté un effondrement des cours de la tonne de CO₂ évitée, le cours chutant en dessous de un euro par tonne. A ce prix, il était devenu beaucoup plus rentable pour un industriel d'acheter un droit à émettre remis à disposition de la bourse que d'investir dans la modification de ses installations afin de les rendre moins émettrices de CO₂ ! Le système d'échange était perverti et avait perdu tout caractère incitatif. En clair, il avait échoué.

Pour la seconde phase, de 2008 à 2012, les droits d'émission ont été fixés à un niveau inférieur de 9% aux précédents. Les quotas alloués annuellement à l'industrie pendant cette phase ont été de 2,1 milliard de tonnes pour l'Europe dont 451 millions de tonnes pour l'Allemagne et de 132 millions de tonnes pour la France. Fin 2012 le cours de la tonne de CO₂ évitée était stabilisé autour de 7 €, le volume des échanges restant faible (demeurant « atone » selon l'expression consacrée !).

A partir de 2013 le système devrait être modifié avec une ambition nouvelle, celle d'atteindre l'objectif de réduction du volume des émissions fixé par l'Union (- 20% en 2020 par rapport à 1990). L'application du système des quotas sera élargie à d'autres secteurs, les plafonds nationaux d'émission seront remplacés par des plafonds européens, les quotas seront réduits linéairement chaque année, ils ne seront plus alloués gratuitement, ils seront vendus selon des modalités restant à fixer.

En Europe, les permis d'émettre étant désormais devenus payants, se posera le délicat problème de l'écart de compétitivité qui se creusera inévitablement entre l'économie européenne et les économies concurrentes qui ne seront toujours pas soumises à l'obligation d'acheter leurs autorisations d'émission... A suivre.

de l'étanchéité du stockage sur le long terme, de l'inertie chimique du CO₂ et de sa non réactivité vis-à-vis des roches réservoirs qui le séquestrent. La pérennité du stockage doit être assurée à minima pour plusieurs siècles ce qui impose une surveillance particulière des zones situées en surface à l'aplomb du réservoir où le gaz est séquestré et des nappes phréatiques.

L'acceptabilité par le public.

Comme pour tout entreposage de matière présentant un risque, il sera nécessaire que les riverains proches des installations de stockage profond et ceux proches des pipe-lines transportant le gaz ou des voies sur lesquelles les camions de gaz carbonique circulent soient convaincus de l'absence de risque de fuites ou de nuisances et de l'efficacité des moyens destinés à faire face à d'éventuelles situations accidentelles.

Il existe un cadre législatif et réglementaire pour le stockage géologique transposé des directives européennes. Sans nul doute ce cadre qui servira de base à la concertation avec le public devra être révisé après une phase de démonstration et d'apprentissage (2010-2020), telle celle débutant sur les gisements de gaz de Lacq.



Bibliographie

ATLAS DE LA PHYSIQUE

Hans Breuer
La Pochothèque

DICTIONNAIRE AMOUREUX DE LA SCIENCE

Claude Allègre
Edition Plon Fayard

DICTIONNAIRE DE LA PHYSIQUE, ATOMES ET PARTICULES

Encyclopaedia Universalis
Albin Michel

EARTH'S DYNAMIC SYSTEMS

W. Kenneth Hamblin, Eric H. Christensen
Edition Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ 07458

GRAINES DE SCIENCES 3

La Main à la Pâte
Editions Le Pommier

LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Paul Depovere
DeBoeck Université

LA RECHERCHE

N° 399, 414, 425, 436, 453, 472 et
Dossiers 2012 (n° 47 et 51), 2013 N° 2

LE BEAU LIVRE DE LA PHYSIQUE.

Clifford A. Pickover
Editions Dunod

LE CORBEAU ET LE RENARD OU LA GRAVITATION DU CAMBERT.

Lucas Salomon et Yann Verchier
Editions Ellipse

L'ÉNERGIE DE DEMAIN, TECHNIQUE, ENVIRONNEMENT, ÉCONOMIE.

L.L. Bobin, E.Huffer, H. Nifenecker
Editions EDP Sciences,

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Claude Acket, Jacques Vaillant
Editions Technip

OUR CHOICE

Al Gore
Young reader's edition

QUELLE ÉNERGIE POUR DEMAIN

Pierre Bacher
Edition Nucléon

SCIENCE À CROQUER

Robert Dinwiddie
Les Editions du Pommier

SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

A. Brahic, M. Hoffert, R Maury,
A. Schaff, M. Tardy
Edition Vuibert

SITES VISITÉS :

- Bulletin de l'industrie pétrolière (Pierre Bauquis avril 2012)
- Commissariat Général au Développement Durable (Bilan énergétique 2011)
- Encyclopaedia Universalis (édition numérique 2012)
- Wikipédia

Remerciements

Nous remercions toutes celles et tous ceux qui ont permis la réalisation de ce document, et surtout **Pierre Schmitt**, bénévole à la Fondation, Ingénieur Arts & Métiers et en Génie atomique, pour son formidable travail.

Leurs relectures et témoignages ont été très précieux pour l'élaboration de cet outil. Un grand merci à Nathalie Bardin, Véronique Bordone et Françoise Cusset.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à EDF et GDF SUEZ pour leur soutien financier.

Bruno Robert,
Chargé de programmes
bruno.robert@fers.asso.fr



La Fondation Entreprise Réussite Scolaire

La Fondation Entreprise Réussite Scolaire a été créée en 1990 par la Ville de Lyon et une quinzaine d'entreprises présentes sur l'agglomération.

Reconnue d'utilité publique, elle agit en concertation avec les municipalités et la direction académique des services départementaux de l'éducation nationale du Rhône pour proposer aux enseignants du primaire un programme visant à améliorer la connaissance des techniques et des métiers contemporains et développer les relations entre l'école, la collectivité, les familles et les entreprises, tous acteurs de la réussite.

Ce document accompagne l'outil pédagogique «Énergies en questions» à destination des élèves du cycle 3 qui est le fruit d'une collaboration entre les chargés de programmes de la Fondation Entreprise Réussite Scolaire, des enseignants de l'école primaire, des scientifiques, des personnels d'entreprises ou d'associations, des étudiants et des bénévoles.

www.fers.asso.fr



Crédits

CRÉDITS ILLUSTRATIONS

Agence Idé
Agence internationale de l'énergie
BP Statistical
C. Mayhew & R.Simmon, NASA
Chaval
Connaissance des énergies
Denis Pessin
Encyclopédie Universalis
Energies2demain
Euracoal
Geoatlas
GeoModel Solar
GIEC
IFP Energies nouvelles
Jacques Rouxel
Jean Laherrère
Livermore National Laboratory
Ma-Météo

Mix et Remix
Patrick Chappatte
Serguei
Zapiro

CRÉDITS PHOTOS

GDFSUEZ / Meysonnier Antoine
Electrabel / De Barse Rudy
Pascal Desbled
Pierre Schmitt

kit
pédagogique
cycle 3

Énergies en questions

