Gymnase de Nyon

L'énergie dans le futur

Par

Yann Cado & François de la Barre

L'énergie dans le futur

Table des matières

1 Scénarios pour l'avenir 3
1.1 Noé 3
1.2 CME 4
2. Politiques énergétiques 5
2.1 Politiques environnementales 5
2.1.1 Protocole de Kyoto 5
2.1.2 Politique environnementale des États-Unis d'Amérique 5
2.2 La société à 2000 watts 6
3. Energies du futur 9
3.1 Energies d'un futur plutôt proche 9
3.1.1 La pile à hydrogène 9
3.1.2 Fusion thermonucléaire 10
3.2 Energies d'un futur plutôt lointain 12
3.2.1 Un moteur à eau de mer 12
3.2.2 Energie héliospatiale 13
3.3 Energies d'un futur plutôt utopique 16
3.3.1 Energie de la foudre 16
3.3.2 Energies thermiques 17
4. Sources 18
5 Annexes 20

1. Scénarios pour l'avenir[1]

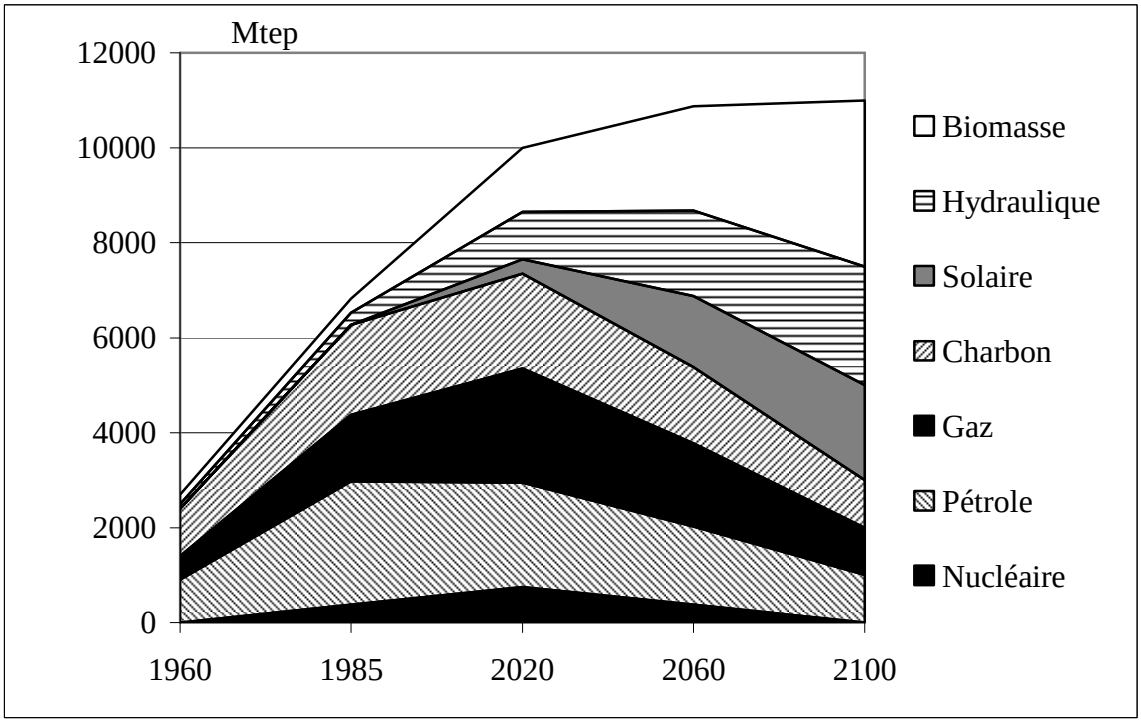
1.1 Noé

Le scénario NOE (Nouvelles Options Energétiques) intègre dans ses calculs le progrès, que ce soit dans la production d'énergie, le transport ou la consommation. D'après lui, d'énormes progrès ont été réalisés et les pays du Sud en développement bénéficient de technologies encore plus performantes que les actuelles. Ces progrès ne peuvent être faits seulement si la réduction progressive de l'utilisation des énergies fossiles et nucléaires devient une cible première.

Ce scénario utilise aussi les énergies renouvelables à un niveau élevé, contrairement au CME. Jusqu'en 2100, il prévoit la stabilisation de l'émission des gaz à effet de serre et du stockage de déchets radioactifs, contrairement au CME qui soutient une augmentation de ces deux problèmes.

L'idée de base est une estimation des besoins réels de chaque personne dans chaque continent, tel la surface habitable, la distance parcourue par année, le confort, etc… Ces calculs nous donnent pour 2020 pour les pays du Sud 1,6 tep/personne et pour les pays du Nord 3,3 tep/personne (CME : 0,8 et 4,6 respectivement…). La consommation totale d'énergie primaire passe alors de 9.5 Gtep actuellement (1997) à 10.1 Gtep en 2020 (6.5 Gtep d'énergies fossiles contre 7.6 Gtep actuellement) et à 11,5 Gtep en 2060. L'énergie nucléaire ne sera plus utilisée à long terme (0,6 Gtep actuellement, 0,25 Gtep en 2060 et 0 Gtep en 2100). Les énergies renouvelables représenteront 27% du total en 2020 (2,75 Gtep), 50% en 1060 (5,75 Gtep) et même 60% en 2100 (8,3 Gtep !). Le principal élément dans ce cocktail sera la biomasse, suivie de près pas l'énergie hydraulique et l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique).

Les estimations prévoient une stabilisation des niveaux de gaz carbonique à un niveau 35% plus élevé qu'aujourd'hui



[1] cf Annexe 1

1.2 CME[2]

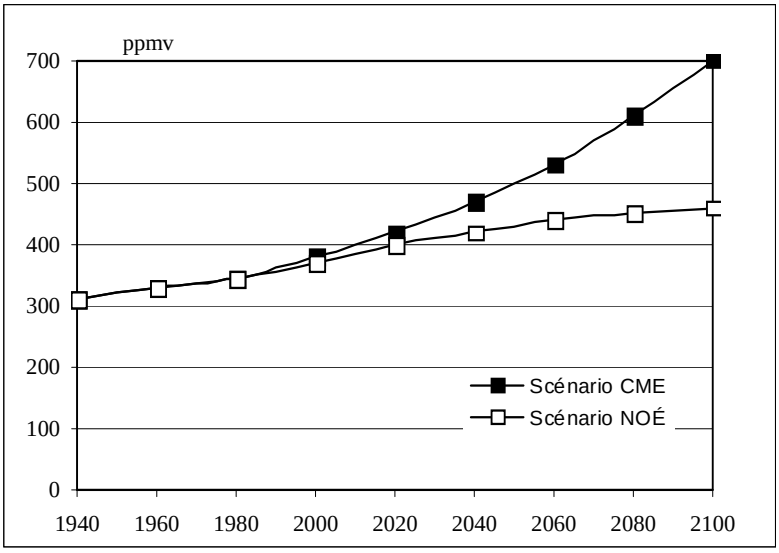
Ce scénario se fonde sur une croissance soutenue du PIB partout dans le monde, mais avec une accélération de la croissance (1% de plus) dans les pays du Sud. Toutefois des écarts importants de niveau de vie subsisteront encore jusque vers 2060.

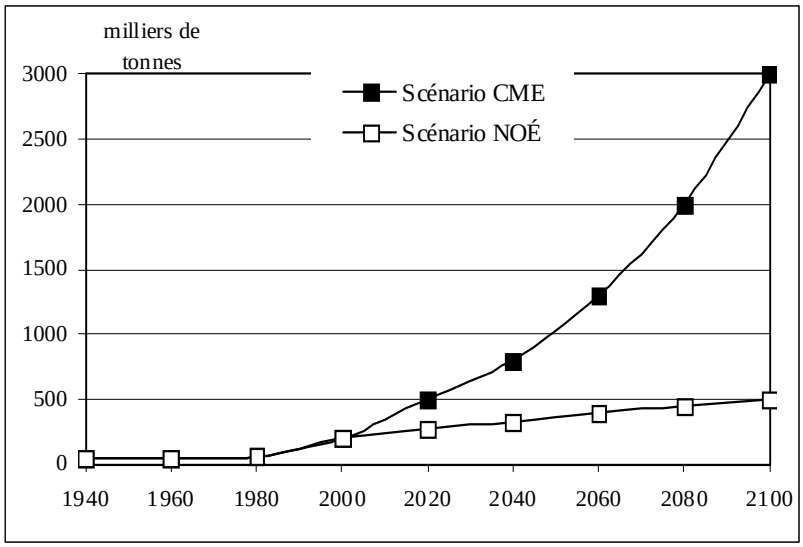
La consommation totale d'énergie primaire augmentera de 1,6% par an et passera alors de 11,73 Gtep en 2006 à 17,01 Gtep en 2030 (13,601 Gtep d'énergies fossiles contre 9,7359 Gtep actuellement).

En 2030, l'émission de CO_2 aura augmenté de 45% par rapport à maintenant (18 Gt à 41 Gt). Les émissions mondiales de gaz à effet de serre, y compris celles de CO_2 et de tous les autres gaz non liés à l'énergie, devraient passer de 44 Gt d'équivalents CO_2 en 2005 à 60 Gt d'équivalents CO_2 en 2030, soit une hausse de 35%. 75% de cette augmentation provient de l'émission de la Chine, de l'Inde et du Moyen-Orient.

Ce scénario recourt aussi de manière massive à l'énergie nucléaire avec 2.9 Gtep de production en 2060 (0.6 actuellement). Une centaine de pays auraient alors des tranches nucléaires en service (contre une vingtaine aujourd'hui) et le stock de déchets nucléaires à longue durée de vie serait 40 fois supérieur5 à celui déjà constitué de nos jours.

Avec 2.75 Gtep en 2020, les énergies renouvelables représentent seulement 16% du total (26% en 2060).





[2] cf. Annexe 2

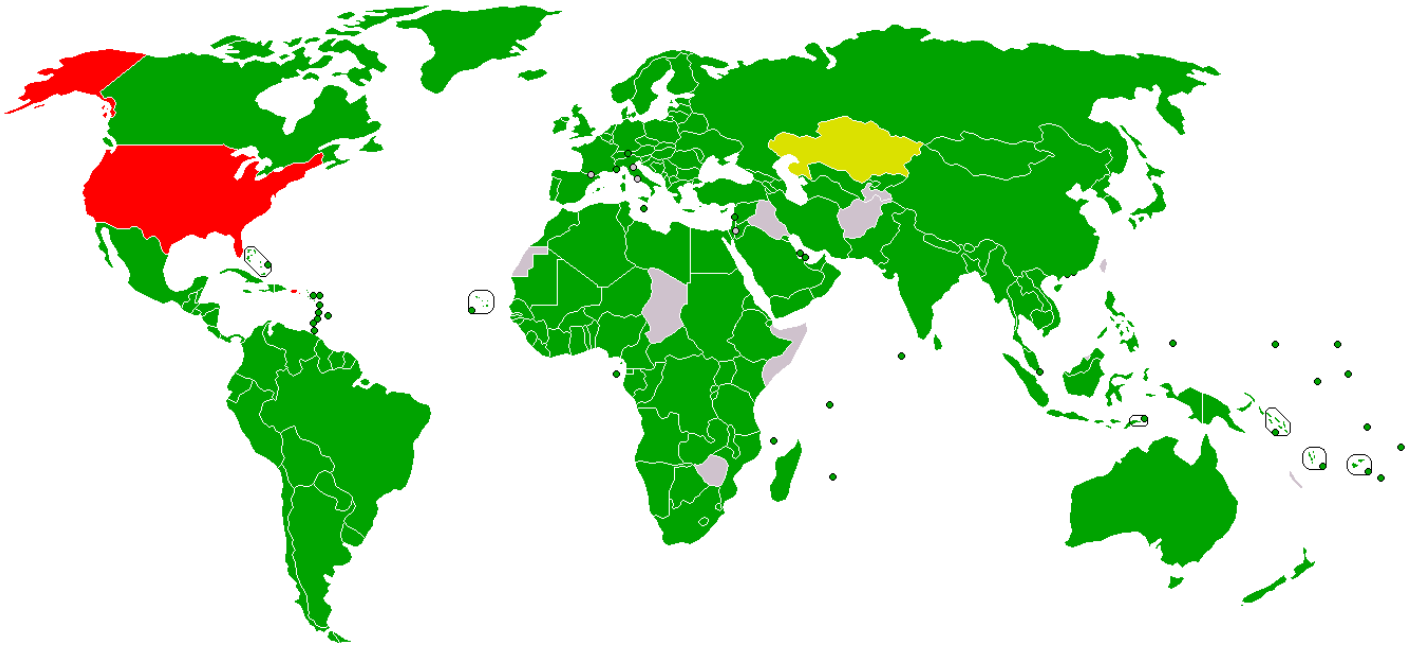
2 Politiques énergétiques

2.1 Politiques environnementales

2.1.1 Protocole de Kyoto

Ouvert le 16 mars 1998 à Kyoto (Japon), entré en vigueur en février 2005. Il a été ratifié (accepté et signé, instauré dans les lois) pour l'instant par 172 pays.

Tous les pays membres de la convention climat ont pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute transformation dangereuse du système climatique. Ils se sont collectivement engagés à prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Concrètement, tous les pays ont l'obligation de publier des inventaires de leurs émissions de gaz à effet de serre, d'établir, de mettre en œuvre et de publier des programmes nationaux contenant des mesures visant à atténuer les changements climatiques.



- **Vert** : Pays ayant ratifié le protocole
- **Jaune** : Pays ayant signé mais espérant le ratifier
- **Rouge** : Pays signataires refusant pour l'instant de le ratifier
- **Gris** : Pays encore non signataires

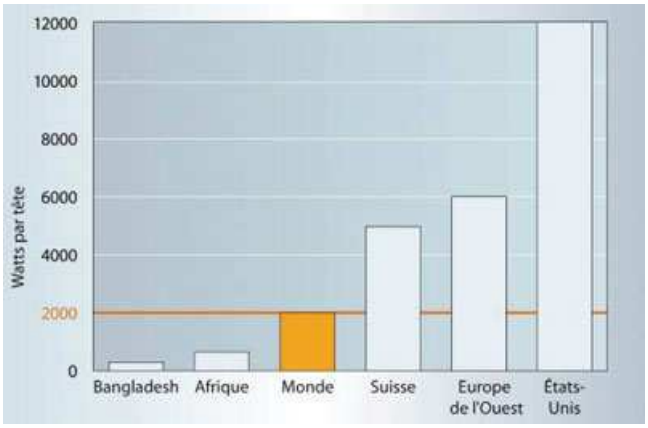
2.1.2 Politique environnementale des États-Unis d'Amérique

Les États-Unis d'Amérique, connus depuis longtemps pour leur société de consommation et de pollution, ont une politique environnementale assez « vieillotte » (pas ratifié Kyoto, volonté d'empêcher tout progrès vers un pays « vert » par les républicains…), quoique ils ont assez progressé ces dernières années. L'état le plus avancé dans ce domaine est la Californie (beaucoup d'éoliennes, énergie solaire, premier à imposer l'essence sans plomb et le pot

catalytique, volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre : les objectifs annoncés sont une diminution de 11 % avant 2010 et 87 % avant 2050). M. Obama a une politique environnementale assez progressive pour un pays comme les USA. Pour lutter contre le réchauffement climatique, il propose d'augmenter le prix de l'électricité, d'investir dans les biocarburants, les énergies alternatives et se déclare favorable à l'instauration d'un marché du CO_2 (obligeant les entreprises polluantes à racheter un « droit à polluer » auprès d'entreprises non polluantes). Il est plutôt favorable également au développement de l'énergie nucléaire comme solution aux problèmes climatiques.

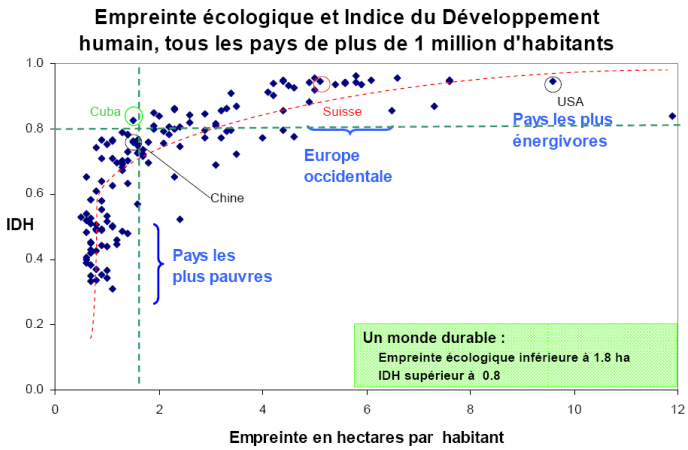
2.2 La société à 2000 watts

Qu'est-ce ?



On le dit, le monde le dit : nous, humains, avons mis en route le lent processus de destruction de notre planète. Qui ne sait rien à propos de pollution, d'effet de serre et d'énergie renouvelable ? Actuellement la consommation (excessive ?) suisse par habitant est de 44000 kWh par année ce qui correspondant à une puissance de 5000 W. Il est maintenant temps de baisser la barre à 2000 W par personne. Pourquoi 2000 W ? Parce que selon *suisse énergie* c'est la moyenne mondiale de consommation actuelle par individu (correspond à 17500 kWh) et elle offre un bon niveau de vie en gardant un équilibre entre les pays industrialisé et ceux qui sont le chemin.

2000 watts résulte du compromis entre empreinte écologique et indice du développement humains (IDH). L'empreinte écologique est la surface de terre et de mer nécessaire pour produire les ressources et pour absorber les déchets correspondants à notre consommation. La bio-capacité de la Terre est de 1.8 hectare par personne. L'IDH se compose de la longévité et la santé d'une population ; l'instruction de celle-ci ; et un bon niveau de vie. L'IDH doit être supérieur à 0.8. Un développement durable respecte ces deux contraintes.



L'ennemi du passé à combattre

La concentration de CO_2 dans l'atmosphère a augmenté de 35% depuis 1880. Cette évolution risque fort de s'accélérer durant les dix, peut-être vingt, prochaines années. La quantité de pétrole restant sur Terre s'amenuise. La consommation augmente chaque année de 2% environ. On pense que l'exploitation maximale sera atteinte en 2030 et déclenchera un crash pétrolier. Approximativement, 80% de l'énergie primaire utilisée dans le monde aujourd'hui sont issus de ressources fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel. (60% en suisse)

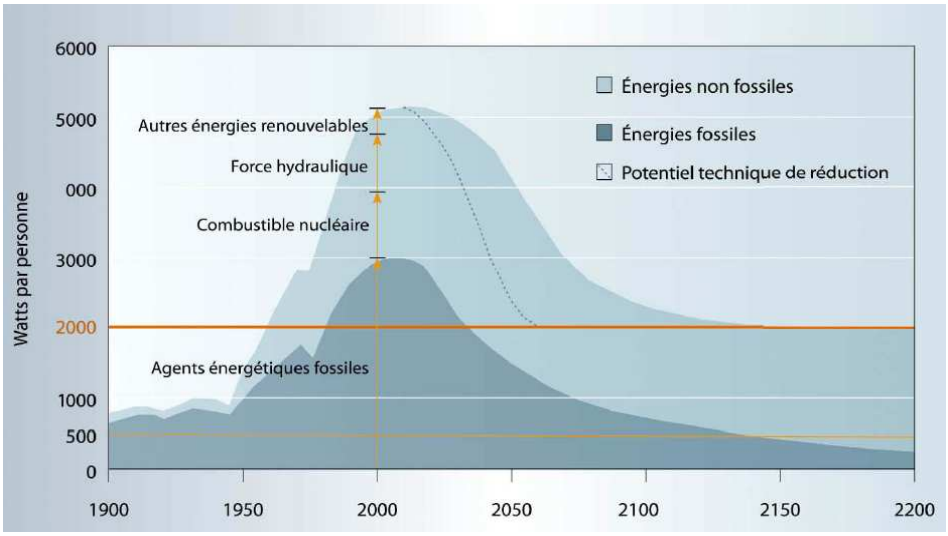
Vivre avec une consommation 2,5 fois moins élevée

Le but doit être atteint le plus rapidement possible. Il faut non seulement réduire la consommation globale à 2000 W, mais aussi réduire les agents non renouvelables pour ne pas dire les faire disparaître !

La part des énergies fossiles représente 3000 W et elle peut être réduite de moitié d'ici 2050. Techniquement, le travail peut être fait bien plus rapidement, or pour que la société à 2000 watts ne soit pas une utopie, il faut prévoir un temps d'adaptation de l'infrastructure et du nouveau mode de vie plus intelligent. Puis, dans la seconde moitié du XXIe siècle, il serait bon de descendre jusqu'à 500 W (ce qui correspond à une tonne de CO_2 par habitant et par année). Un tel objectif suppose une baisse de 10% du volume actuel par décennie.

La qualité de vie doit pouvoir encore s'améliorer malgré cette politique et cela provoquera une hausse des revenus de 60% dans 50 ans. Les principaux champs d'action sont l'efficacité des matériaux et de l'énergie ; la substitution des énergies renouvelable aux énergies fossiles ; et l'instauration d'une nouvelle forme de vie.

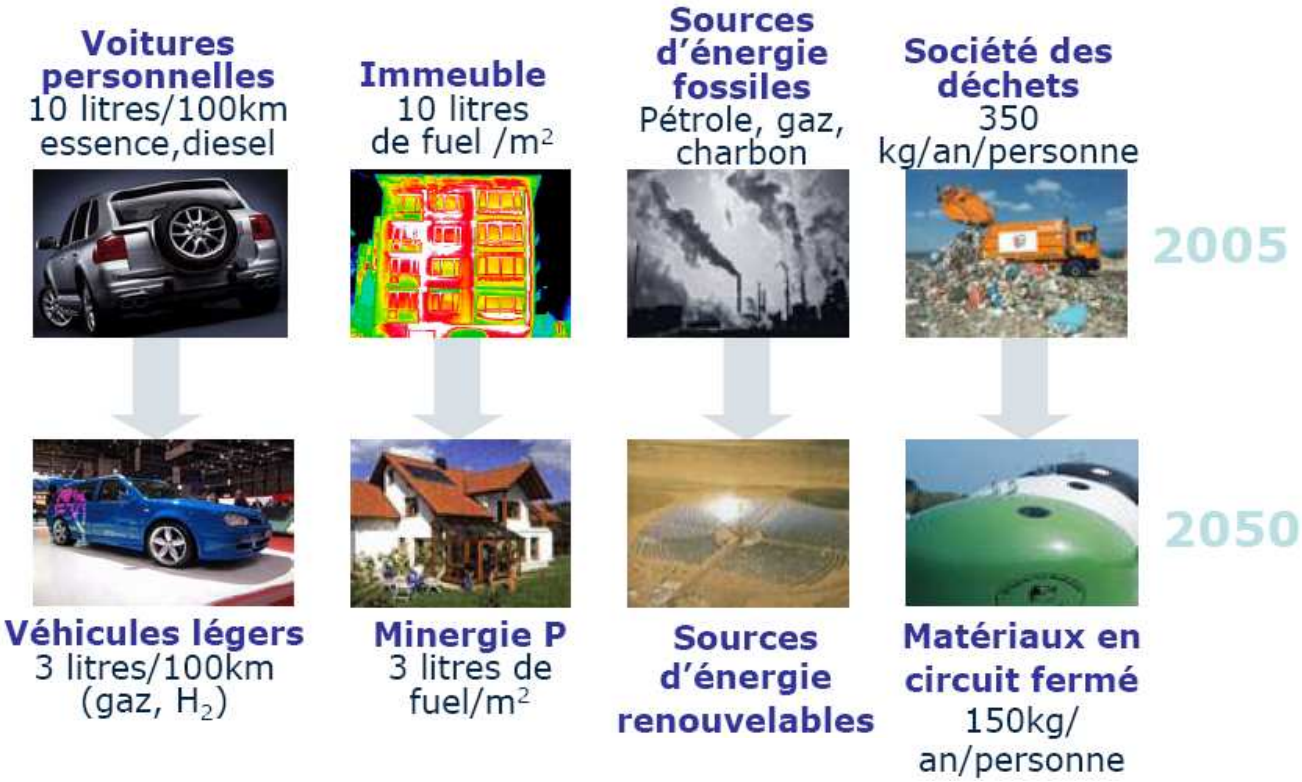
Evolution possible vers la société à 2000 watts selon Novatlantis

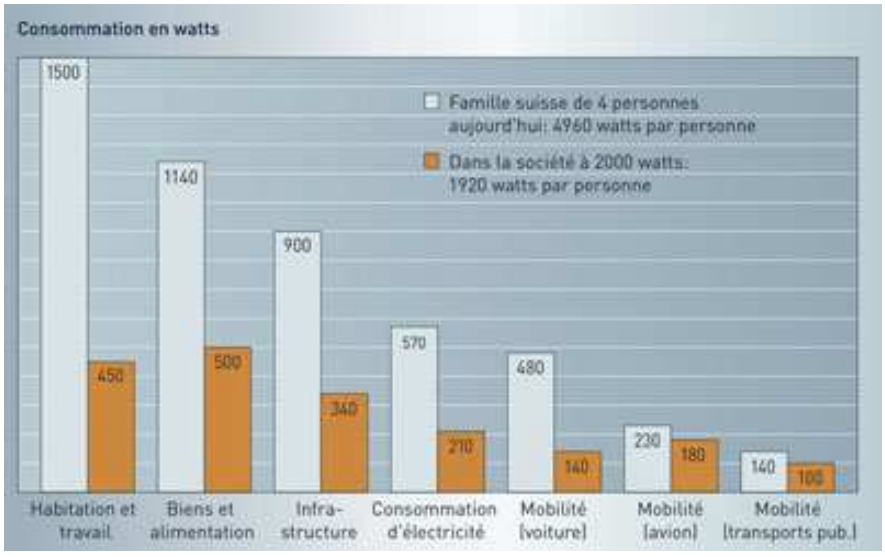


Et en plus, c'est possible !

Les scientifiques assurent que la société à 2000 watts est réalisable. Le rythme de renouvellement de certains biens est lent (bâtiments) mais si on renouvelle écologiquement lorsque le moment est venu, le pari est gagné ! Les potentiels sont énormes ! Rien que dans la mobilité, nous sommes actuellement en train de réduire les émissions de 30% grâce aux moteurs au gaz naturel. En 2050, un quart des

besoins énergétiques actuels suffira aux véhicules optimisés. En bref la société à 2000 watts c'est ça :





3. Energies du futur

3.1 Energies d'un futur plutôt proche

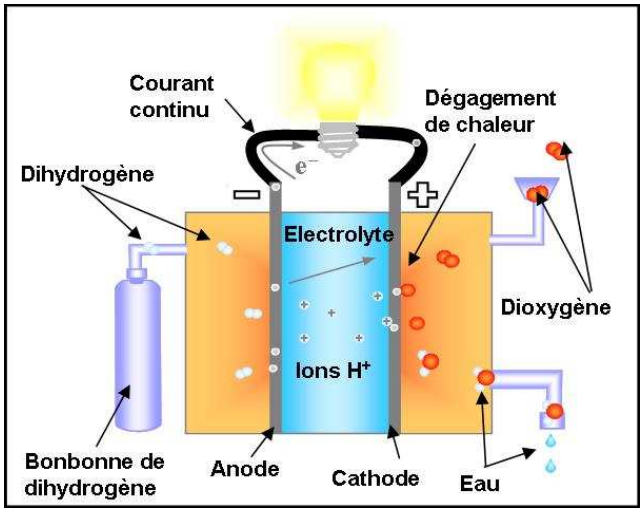
3.1.1 La pile à hydrogène

La pile à hydrogène est une simple amélioration de la pile à combustible inventée par Sir William Grove en 1939. L'avantage principal en la substituant à un moteur thermique, est que l'on passe d'un rendement de ~20% à ~50% tout en évitant les pollutions car le rejet est … de l'eau !

Comment fonctionne une pile à hydrogène ?

Expliquons d'abords comment fonctionne une pile normale (dite électrique ou sèche). Le principe utilisé est l'électrolyse à l'envers d'un

liquide. On transforme de l'énergie chimique en électricité grâce à des réactifs non renouvelés introduits lors de la fabrication (à la différence d'une pile à combustible où ils sont réapprovisionnés). La pile à hydrogène fonctionne sur la création d'eau grâce aux gaz H_2 et O_2. Cette réaction se déroule dans une structure composée d'une anode et d'une cathode séparés par une membrane. Du dihydrogène est envoyé sur l'anode qui le sépare en deux ions H^+. Ceux-ci diffusent dans l'électrolyte, alors que les électrons créés par cette réaction circulent dans le circuit externe : on a produit un courant électrique. La cathode est alimentée par du dioxygène qui provient de l'air et se dissocie en deux atomes d'oxygène pour créer de l'eau à la rencontre des ions H^+ et de leur électrons qui arrivent dans la cathode. Cette réaction dégage énormément de chaleur (il faut donc prévoir un système de refroidissement).



Produire du dihydrogène

L'hydrogène compose 90% de l'Univers. Cette ressource naturelle ne risque donc pas de s'épuiser rapidement. Le problème est maintenant d'exploiter l'hydrogène (sans polluer) et de le transformer en dihydrogène (H_2), beaucoup plus rare ! En effet, le gros point noir de la pile à hydrogène est qu'elle n'est pas entièrement une « énergie verte ». Produire son carburant pollue ou/et consomme encore beaucoup d'énergie ! Pour l'instant, l'homme possède 3 grands moyens plus ou moins acceptables afin de produire du H_2 :

- A partir de carburants fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon)
  ⇨ Système non renouvelable !
- A partir du méthanol
  ⇨ Système non renouvelable !
- Par électrolyse
  ⇨ Consomme de l'électricité

Il y a aussi d'autres idées possibles plus ou moins hasardeuses (utilisation d'algues, fusion nucléaire, photosynthèse,…). Le meilleur plan est de produire du dihydrogène dans le cadre d'une autre manipulation. Mais actuellement, le mieux est de faire l'électrolyse avec de l'électricité qui a été produite proprement (hydraulique, éolien, …).

Le débat reste ouvert !

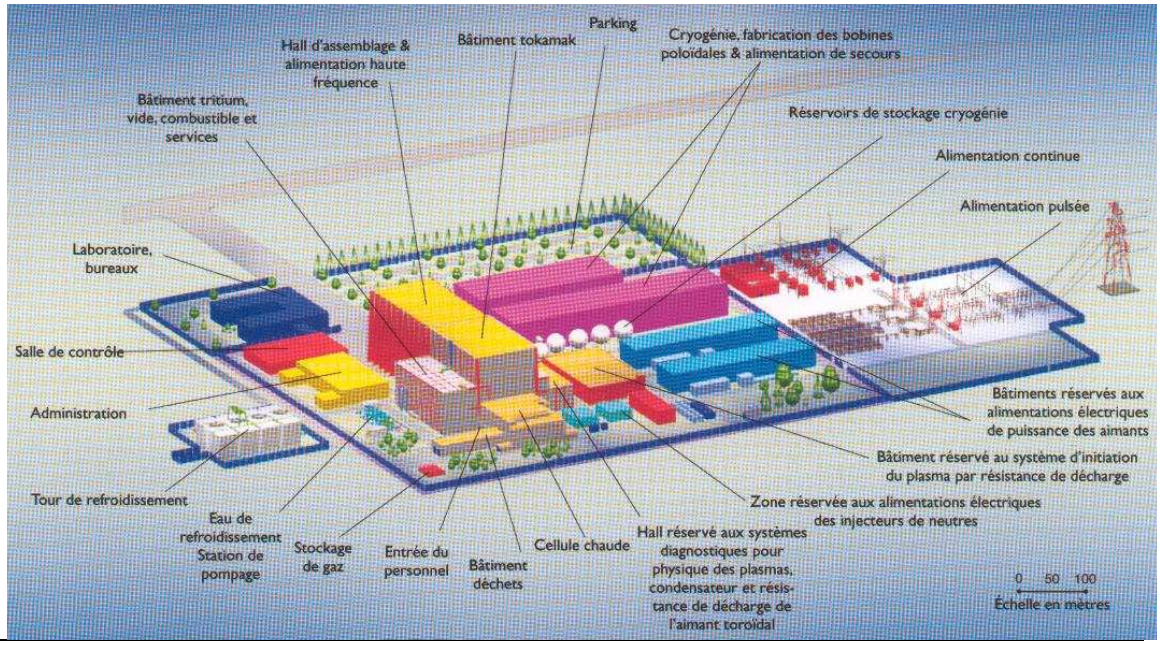
3.1.2 Fusion thermonucléaire

Enjeux

La fusion thermonucléaire a tout l'air d'être une grande solution pour les besoins énergétiques de la planète. En effet, ceux-ci devraient doubler voire tripler d'ici 2050. Même si les énergies dites renouvelables sont parfaites pour des situations isolées, il faudra cependant trouver quelque chose d'autre car elles ne sont pas assez équitablement réparties pour répondre à un besoin soutenu (en effet des endroits sont dépourvus d'eau, de vent ou ont des conditions non propices aux panneaux solaires), de l'ordre de la puissance industrielle. Une solution plus « réaliste » réside dans notre capacité à utiliser une substance énergétique de départ suffisamment abondante pour des milliers d'années et facile à mettre en place rapidement si le monde doit assister à un crash pétrolier. Une fois qu'un état stable sera retrouvé, l'idéal serait de petit à petit compléter tous nos besoins énergétiques en énergies renouvelables (un saut brusque du pétrole au renouvelable semble improbable ; a moins que chaque état du monde applique une politique similaire à la société à 2000 watts en Suisse)

Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, aussi *La voie* en latin) sera le prochain grand tokamak (machine pour la fusion) expérimental. L'objectif est de démontrer la faisabilité de ce système. ITER à été conçu dans le cadre d'une coopération internationale (UE, Chine, Japon, Inde, Russie, République de Corée et USA). ITER doit pouvoir produire 500 MW d'énergie de fusion avec un facteur d'amplification par 10 ! L'investissement coûte 4,6 milliards d'Euros. ITER sera construit en France près de Cadarache.

Modèle du Site ITER



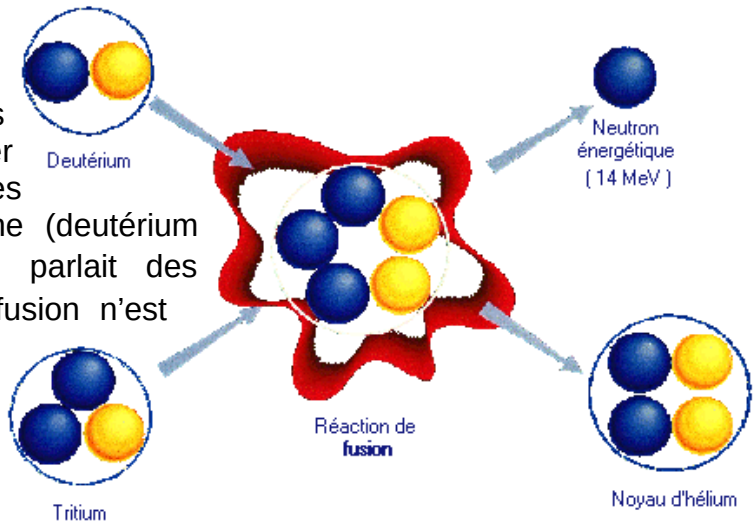
Potentiel

C'est ici qu'intervient la fusion thermonucléaire. Elle possède des avantages attrayants : on n'a besoin que de deutérium (qui peut être exploité en grande quantité dans la mer pendant des millions (ou milliards) d'années) et de tritium (qui peut être généré à partir du lithium abondamment présent dans la croute terrestre), le procédé ne génère pas de déchets radioactifs et ne dégage absolument pas de CO_2. On entend déjà le monde dire : « C'est trop beau pour être vrai ! ». Rassurez-vous et lisez les inconvénients : un gros problème réside dans la construction des installations et dans la façon de produire l'énergie (voir *Comment ça marche ?*) Il faut garder à l'esprit que le procédé est certes relativement propre pour l'environnement mais la construction de centrale de ce type l'est sûrement moins ! De plus, un des éléments nécessaire au procédé est radioactif : le tritium, Il se fait certes transformer en hélium sans contact humain (voir *Obtenir du tritium*), mais il rend le tokamak radioactif. L'avantage net est que la radioactivité engendrée devient négligeable au bout de 10-15 ans contre des centaines de milliers voire des millions d'années pour les déchets de fission (par exemple le plutonium 239 restera radioactif pendant au moins 240'000 ans soit ~6'800 générations).

Le meilleur plan serait que le site ITER soit construit de manière durable. Rappelons qu'actuellement, la technologie est belle sur papier mais peut-être pas réalisable. Mais qui sait, nous verrons en 2025.

Comment ça marche ?

A l'inverse de la fission nucléaire où l'on casse de gros noyaux instables, la fusion est un procédé qui, à partir de petits noyaux, en fait un plus grand. Il y a plusieurs réactions possibles mais la plus facile à réaliser sur Terre est celle qui utilise les deux isotopes de l'hydrogène (deutérium (^2_1H) et tritium (^3_1H)). On parlait des inconvénients, en voici : la fusion n'est pas une réaction en chaîne, il faut chaque fois en démarrer une. De plus, Il faut faire perdre les électrons aux éléments et augmenter leur vitesse afin que les noyaux puissent se rapprocher et démarrer les réactions atomiques (grâce à la force forte). Pour ce faire, il faut utiliser du plasma, ce gaz ionisé ou, sous l'effet de températures de 100 à 150 millions de ℃, les élect rons se détachent des noyaux et ceux-ci atteignent des vitesses considérables.



Comment obtenir ce plasma ? Trois méthodes de confinement (isolation d'une installation nucléaire visant à empêcher des produits radioactifs de se répandre hors d'un périmètre de sécurité) sont possibles : le confinement gravitationnel qui est utilisé dans le soleil et les étoiles mais qui n'est pas possible sur Terre, le confinement inertiel et le confinement magnétique. Pour le confinement inertiel, il s'agit de concentrer l'énergie sur un très petit volume grâce à des faisceaux laser

venant de tous les côtés. Ceci chauffe la matière jusqu'à des températures de fusion thermonucléaire. Dans le confinement magnétique, le gaz ionisé est chauffé de l'extérieur et un champ magnétique le confine dans un espace réduit sous forme de plasma.

Maintenir le plasma en forme est une lourde tâche : en plus d'élever la température il faut garder le plasma hors de contact avec les parois (car une partie s'en évaporerait). Il faut beaucoup d'énergie pour mettre en route le système mais après il est possible d'utiliser la chaleur produite pour garder le plasma chaud.

Obtenir du tritium

Le tritium est un élément radioactif et les scientifiques du monde entier refusent d'avoir le même problème qu'avec la fission : transporter des éléments radioactifs d'un bout à l'autre de la planète. Une des caractéristiques uniques de l'énergie de fusion réside dans le fait que le tritium est produit et utilisé dans la même machine en circuit fermé ! Il ne nécessite aucun transport, sauf pour le démarrage et le démantèlement.

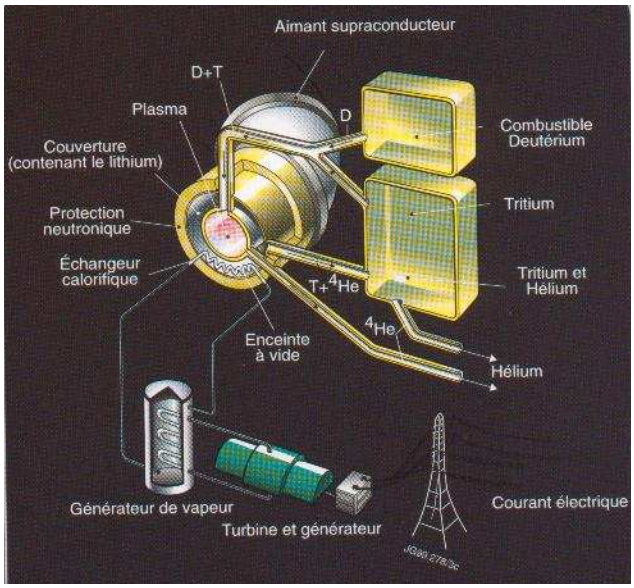


Schéma de principe d'une centrale de fusion

Donc, ensuite, on fait rencontrer un noyau de deutérium et un de tritium ce qui donne une réaction de fusion et, au final, un noyau d'hélium et un neutron. La masse du deutérium et du tritium est supérieure à celle des éléments d'arrivée. Une faible quantité de matière (~38/10000) s'est donc transformée en énergie selon la célèbre équation $E = mc^2$.

3.2 Energies d'un futur plutôt lointain

Dans ce chapitre se trouvent des concepts possibles mais plutôt vagues. Ces principes lointains, comme suggère le titre, sont encore en discussions et réflexions par la communauté scientifique. Rien ne garanti la faisabilité (on se rappelle de l'affaire de la « fusion froide »).

3.2.1 Un moteur à eau de mer

Il y a plus d'un an, un ingénieur américain retraité a fait la plus grande découverte depuis un siècle dans le domaine de l'eau. Alors qu'il travaillait sur un moyen de détruire les cellules tumorales, John Kanzius a réussi par hasard à enflammer de l'eau salée. L'expérience est étonnante : il place un tube à essais rempli d'eau salée dans un générateur de micro-onde et le soumet à une fréquence de 13,56 MHz et à une puissance entre 100 W et 250 W. Une fois que le liquide atteint 1600℃ on peut faire brûler du p apier en l'approchant du tube.

L'inventeur a reçu le soutien de Rustum Roy (de la *Pennsylvania State University*), un physicien connu, qui présente sur son propre site la vidéo de l'eau enflammée ainsi que les travaux de John Kanzius (http://www.rustumroy.com/).

Comment est-ce possible ?

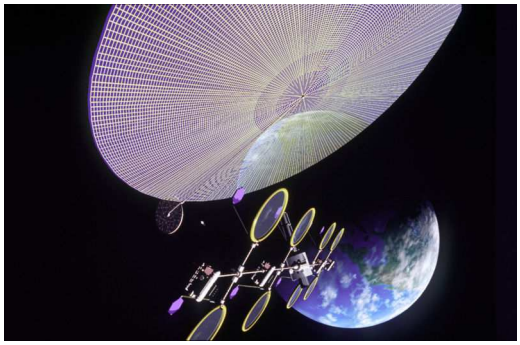
Selon John Kanzuis : « Tout se passe comme si l'énergie des micro-ondes 'cassait' les fortes liaisons entre atomes d'hydrogène et d'oxygène qui forment les molécules d'eau, libérant l'hydrogène sous forme de H_2 ; une fois enflammé, celui-ci peut être capturé ou brûler en continu jusqu'à son épuisement, tant qu'il y a exposition aux radiofréquences ». Mais d'un point de vue de la recherche fondamentale, il reste à décrire le phénomène, car le sel ajouté dans l'eau joue un rôle capital et encore incompris. En effet, lorsque l'eau monte à des températures extrêmes, son pH descend entre 7 et 5, ce qui forme des dissociations des molécules d'eau en ions H_30^+ et OH^- et rend impossible le dégagement de dihydrogène ! Tout porte à penser que le sel intervient dans cette histoire. Les physiciens et chimistes ont du pain sur la planche !

Des applications ?

Il n'est pas nécessaire de s'étendre sur toutes les applications possibles avec une telle technologie. Nous avons ici un nouveau moyen de produire du dihydrogène (pour par exemple une pile à hydrogène), ou une source d'énergie la plus propre qui pourrait bien atterrir dans nos moyens de transport !

3.2.2 Energie héliospatiale

Qu'est-ce ?



Vue d'artiste d'un satellite solaire spatial

Appelée aussi *énergie solaire extra-atmosphérique* ou encore *solaire spatial* et défini comme la « source ultime de l'énergie propre », l'énergie héliospatiale est un concept très simple : il s'agit d'utiliser l'énergie solaire dans l'environnement où elle est le plus présent : l'espace ! L'idée de ce type de projet est d'installer dans l'espace de gigantesques stations orbitales comprenant d'énormes surfaces de capteurs solaires. L'énergie récupérée serait huit fois supérieure à celle actuellement (voir *Comparaison avec ce qui se passe sur Terre*) et disponible 24h/24h. Ensuite l'énergie serait envoyée sur des capteurs à la surface de la Terre sous forme de micro-ondes puis convertie en électricité. A condition de bien viser, car sinon tous les corps vivants serait chauffé comme à l'intérieur d'un micro-onde !

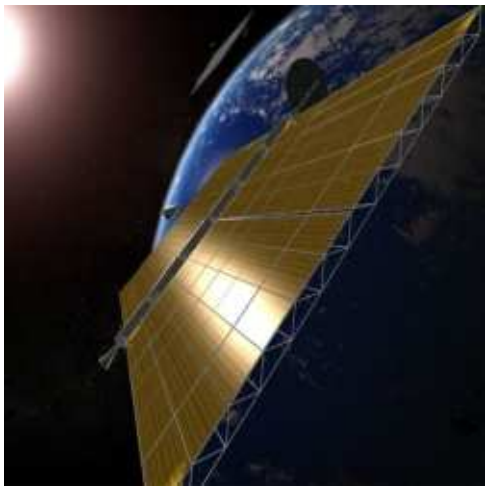
Avantages

Si l'on transmettait l'énergie solaire directement depuis l'espace, les missions de secours pourraient faire fonctionner leurs appareils à l'aide de quelques antennes et de transformateurs portatifs n'importe où sur le globe. Les campeurs pourraient aussi se servir de cette énergie pour préparer leurs repas avec rien d'autre qu'un appareil cellulaire ressemblant à un téléphone (déjà possible avec le solaire). Le problème du transport de l'énergie vers certains endroits inaccessibles aux lignes électriques serait résolu, de même qu'absolument tout le réseau électrique pourra être supprimé ! L'énergie tombera du ciel selon des faisceaux précis et localisé où qu'on soit, quoi qu'on fasse et à n'importe quel instant de la journée ! (ou de la nuit)

Energie du futur ou du passé ?

La première idée à propos de cette technologie a été proposée par Peter Glaser en 1968. Repris par l'état Américain en 1970 lors de la crise pétrolière, le concept reçu le nom de SPS (Solar Power Satellites) et fut rapidement abandonné devant l'ampleur du problème et le coût exorbitant de ce genre d'installation. Mais lorsque le pétrole ne sera plus, que les panneaux solaires auront colonisés la Terre à l'équateur (car le rendement ailleurs est mauvais à cause de l'inclinaison) et que la technologie aura évolué, ce projet fou verra peut-être le jour à des prix abordables … On parle actuellement de 20'000,- le kilogramme et le SPS pèserait environ 30'000 à 50'000 tonnes !!

Dimensions



Vue d'artiste : taille d'un SPS

La taille d'un SPS, sera dominée par deux facteurs : celle de la collecte des appareils (par exemple, des panneaux, des miroirs, etc) et celle de l'antenne de transmission, qui dépend en partie de la distance à l'antenne de réception (=distance Terre-SPS : ~35'700 km).

La dimension optimale d'un SPS est un rectangle de 5 x 10 km composé d'un capteur solaire de 1 km de diamètre. Les capteurs terrestres (appelés rectenna) sont des ellipses de 10 x 13 km et pourront être conçu de manière à laisser passer la lumière du Soleil de sorte que l'on puisse installer des panneaux solaires terrestres en-dessous. La quantité d'énergie à disposition d'un SPS comme celui-là est de 5 GW. Jusqu'à présent, aucunes preuves d'effets sur la santé des micro-ondes d'exposition n'ont été démontrées, bien que la question demeure controversée. La raison pour laquelle le SPS possède une taille titanesque vient de la physique de la puissance rayonnante. Il faudrait néanmoins une surface de 2,4 km^2 pour générer 1 GW en continu.

Pour être plus efficace, il faudrait entre 50 et 100 km^2 de capteurs et avoir de nouvelles cellules photovoltaïques encore à l'état de projet. Mais dans les deux

cas la structure du SPS serait essentiellement d'un kilomètres de diamètre, ce qui fait partie des plus grandes structures que l'Homme ait jamais construites sur Terre. Alors que des structures du bâtiment de cette taille en orbite n'ont pas encore été tentées, la construction d'un SPS dans l'espace est pour l'instant au-delà des capacités d'ingénierie de l'humanité

Fonctionnement

Trop peu de choses sont actuellement connues sur les aspects techniques, économiques et environnementaux du SPS afin de faire la bonne décision pour procéder à son développement et à son déploiement. En 2004, la Nasa présente trois modèles SPS : PV, CPV et SD.

- Le photovoltaïque (PV) utilise des cellules semi-conductrices pour convertir directement les photons en électricité par le biais d'un mécanisme de la physique quantique, mais des questions affectent son rendement car les cellules utilisées doivent être légères et pas trop chères et par conséquent le rendement chute de 35% à 20%. En outre elles devront être résistantes aux rayonnements.
- Le photovoltaïque concentré (CPV) utilise des systèmes de miroirs et de lentilles pour concentrer la lumière du Soleil sur un appareil de type PV. Cette méthode est en mesure d'atteindre des rendements de plus de 40% ! Exactement comme le système SD, l'avantage net est que d'envoyer des miroirs dans l'espace est bien moins couteux que des panneaux solaires. Gérer des miroirs dans l'espace est d'une grande facilité car ils sont en chute libre et peuvent être construits à partir de très minces feuilles d'aluminium ou autres métaux très légers avec des cadres, ou des matériaux disponibles dans l'espace (par exemple, sur la surface de la Lune (une étude de l'institut d'études spatial (SSI) a montrée que 98% de la masse du SPS est constructible a partir de matériaux extraits de notre satellite.) Maintenant, il est sûrement plus simple de construire depuis la Terre, à discuter !)

Encore une vue d'artiste

- Le Solar Dynamic (SD) utilise un moteur thermique constitué d'un piston et d'une turbine qui produit un mouvement de chaleur. Celle-ci est ensuite reliée à une dynamo qui produit de l'électricité. La chaleur est générée à partir de grands miroirs comme CPV et on retrouve les mêmes avantages. Malheureusement il n'y a aucune preuve que cette solution fonctionnera en orbite.

Ensuite, l'énergie est envoyée sous forme de micro-ondes à une fréquence de 2.45GHz sur Terre où ils sont reçus sur des capteurs et reconvertis en électricité.

Comparaison avec ce qui se passe sur Terre

Un panneau solaire dans l'espace reçoit 1400 W/m^2. Sur Terre, l'alternance jour-nuit réduit de moitié le temps de fonctionnement, l'angle oblique des rayons du Soleil (sauf à midi dans les tropiques) coupe en deux encore le rendement (les panneaux solaires peuvent être inclinés dans la direction du Soleil, mais ils doivent ensuite être repartis sur un plus grand terrain pour éviter les ombres des

autres) et enfin l'atmosphère divise encore la lumière disponible par deux. Ainsi, la lumière est environ huit fois moins abondante sur Terre (175 W/m^2). Certes la conversion en micro-onde, les pertes durant le voyage et la réception de ce dernier réduisent l'efficacité mais nous sommes encore bien au-dessus du facteur huit de division.

Il est clair, que l'énergie de réalisation d'un système (fabrication, lancement, déploiement,…) doit être remboursée par l'utilisation de celui-ci en temps relativement court. L'amortissement énergétique d'un panneau solaire sur Terre est de 1-2 ans. Actuellement le temps d'amortissement d'un SPS est de 1 à 4 ans. Mais lorsque le projet pourra voir le jour, on parle de 25,9 heures ! (uniquement pour le panneau solaire)

En bref

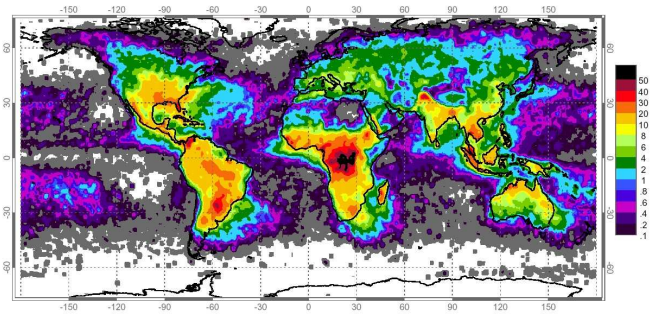
Malgré le déclin de l'intérêt pour le SPS après 1970 par les politiques, il se pourrait dans un avenir proche qu'un renouveau d'attention se produise, puis dans un avenir lointain, la réalisation et le fonctionnement parfait de cette nouvelle énergie renouvelable. La combinaison de matériaux légers, peu coûteux et d'une infrastructure spatiale peut rendre le SPS réel. Certaines entreprises parlent d'une perspective économique viable en 2020. En 2001, le Japon a annoncé qu'il allait construire une centrale de ce type : elle devrait être terminée en 2040. Cette centrale orbitale fonctionnerait avec deux panneaux solaires géants de 1 x 3 km et pèserait 20 000 tonnes. Mais d'après certaines estimations, lorsque l'héliospatial entrera dans la vie quotidienne ce sera plutôt dans une centaine d'années …

3.3 Energies d'un futur plutôt utopique

Ce chapitre présente bien des concepts que l'on pense irréalisables. Ceux-ci sont tous aux stades de pensées, d'allusions ou d'expériences classées improbables. Ce ne sont que des ébauches, c'est pourquoi les chapitres seront plutôt courts.

3.3.1 Energie de la foudre

On estime à 32 millions le nombre d'éclairs frappant le sol chaque année dans le monde. La puissance moyenne d'un éclair est de 20 GW. Un orage peut avoir jusqu' des dizaines de milliers d'éclairs. La puissance d'un orage à 1000 éclairs serait alors de 20 TW ! Mais beaucoup de problèmes se posent. Premièrement, même si la puissance instantanée d'un coup de foudre est extrêmement forte, la puissance moyenne sur un an reste faible (environ 100 MW). Ensuite vient le souci de la récupération. Emmagasiner en temps record autant d'énergie est un casse-tête chinois qui ne vaut pas la peine d'être étudié car l'énergie exploitable est minime si l'on se souvient qu'il est



Fréquence de la foudre dans le monde. Les zones équatoriales sont les plus touchées

impossible (pour l'instant ?) de prévoir où tombera la foudre, donc qu'une installation peut ne jamais avoir la visite de la colère de Zeus.

Mais imaginons une réalité où l'homme a inventé de mini capteurs transportables qui attirent la foudre sur elle, puis emmagasine l'énergie pour faire fonctionner des installations gourmandes et isolées. Des appareils de ce genre sont installés sur toutes les hauteurs et alimentent de gros village. C'est beau de rêver !

3.3.2 Energies thermiques

Beaucoup d'objets que nous utilisons tous les jours produisent de la chaleur qui se perd dans la nature. On pourrait imaginer de récupérer la chaleur de tout et n'importe quoi : les moteurs, les lampes, les ordinateurs, … Un circuit de liquide prendrait l'énergie thermique à l'appareil puis la transformerait en énergie utile. C'est l'idée des pompe à chaleur (PAC), le problème est de tout miniaturiser. On pourrait même utiliser la chaleur humaine. Certains cinéastes y ont déjà pensé (par exemple des machines qui fonctionnent grâces à l'énergie humaine), mais plus raisonnablement ; pourquoi ne pas développer un système qui nous rafraichirait pendant un effort et qui utiliserait notre énergie thermique pour faire fonctionner un baladeur ?

Installation des tuyaux dans la ferme

Autre application très téméraire : utiliser le réchauffement climatique de la Terre. La ferme expérimentale de la Blanche maison, dans la Manche teste des moyens de récupérer de la chaleur sous l'aire paillée. Des capteurs de chaleur sont enterrés de 15 à 20 cm. En un mois d'hiver, l'eau qui circule atteint 22℃ et permet d'alimenter une pomp e à chaleur. L'humanité pourrait un jour faire de même dans des lieux très chauds et ainsi obtenir de l'énergie en utilisant la chaleur indigène. La deuxième loi de thermodynamique dit que l'entropie augmente toujours : il n'est pas possible de faire fonctionner des systèmes infiniment et mutuellement (par exemple un spot alimenté par un panneau solaire qui éclaire celui-ci). Si l'énergie produite pas cette méthode servira à alimenter un appareil qui produit de la chaleur, on ne peut pas transformer entièrement celle-ci à nouveau en énergie utile : les pertes sont inéluctables : l'énergie finira toujours par se dégrader et revenir sous forme de chaleur ! Mais peut-être un jour l'entropie n'augmentera qu'extrêmement peu …

Energie thermospatiale

Le soleil nous envoie plein de choses : des photons, toutes sortes de rayonnement (infrarouge, lumière, micro-onde…), des particules diverse (neutrino, …) etc… Le grand problème est de réussir à les concentrer afin de les capturer plus efficacement. Il faudrait trouver des moyens pour utiliser encore plus notre vieille étoile. (la puissance instantanée du Soleil vaut ~400 YW et celle

reçue sur Terre ~1370 MW/m^2.) Mais le génie humain n'arrête jamais de nous surprendre, et qui sait ? Nous verront ce que l'avenir nous réserve !

4. Sources

1. **Scénarios pour l'avenir**
   - 1.1. **Noé**
     - http://www.gymnyon.vd.ch/enseignement/cours/energie/E+S.pdf
   - 1.2. **CME**
     - http://www.gymnyon.vd.ch/enseignement/cours/energie/E+S.pdf
     - http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_french.pdf
2. **Politiques énergétiques**
   - 2.1. **Politiques environnementales**
     - 2.1.1. **Protocole de Kyoto**
       - http://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
     - 2.1.2. **Politique environnementale des États-Unis d'Amérique**
       - http://fr.wikipedia.org/wiki/Politique_environnementale_des_États-Unis_d'Amérique
   - 2.2. **SUISSE : La société à 2000 watts**
     - *Vivre plus légèrement, Une nouvelle conception de nos ressources pour un développement durable : la société à 2000 watts* par Novatlantis, Sia et Suisse énergie (parution : date inconnue)
     - *La société à 2000 watts sans nucléaire, Projet de Conception générale de l'énergie du canton de Genève 2005-2009* par Dr Olivier Ouzilou, Directeur ENERGISSIMA (parution : 14 juin 2007)
3. **Énergies du futur**
   - 3.1. **Énergies d'un futur plutôt proche**
     - 3.1.1. **La pile à hydrogène**
       - http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A9lectrique
       - http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible
       - http://benoit.hennekinne.club.fr/
     - 3.1.2. **Fusion thermonucléaire**
       - http://claude.emt.inrs.ca/VQE/sources/fusion.html
       - http://www.plasmaquebec.ca/La_physique_des_plasmas/Human%20Plasmas/Fusion.htm
       - *Energie plus propre pour l'avenir, Le développement de l'énergie de fusion* par l'EFDA (European Fusion Development Agreement) (parution : 2008)
       - http://www.greenpeace.org/raw/content/belgium/fr/press/reports/fichenucleaire4.pdf
   - 3.2. **Énergies d'un futur plutôt lointain**
     - 3.2.1. **Un moteur à eau de mer**
       - *Science et vie* n°1088 (parution : mai 2008)

- http://www.rustumroy.com/

3.2.2. Energie héliospatiale

- http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_satellite
- http://www.freemars.org/history/sps.html
- http://www.planete-energies.com/contenu/energies-renouvelables/voies-du-futur/energie-solaire-extra-atmospherique.html
- http://www.enerzine.com/1/6103+le-solaire-spatial---la-source-ultime-denergie-propre+.html
- http://gadgetvice.com/wp-content/uploads/2008/10/22/panneaux_solaires_espace_02.jpg

3.3. Énergies d'un futur plutôt utopique

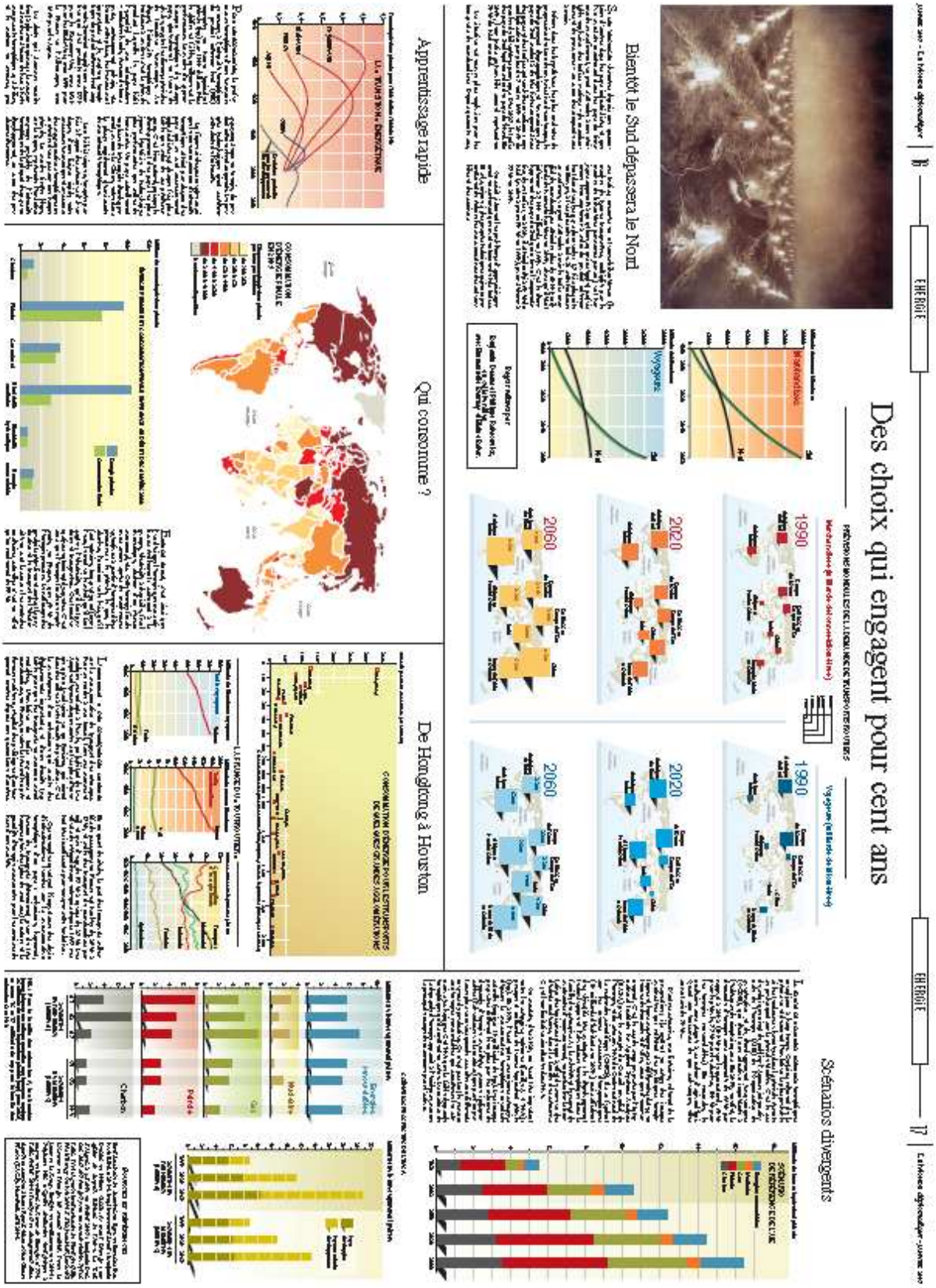
3.3.1. Energie de la foudre

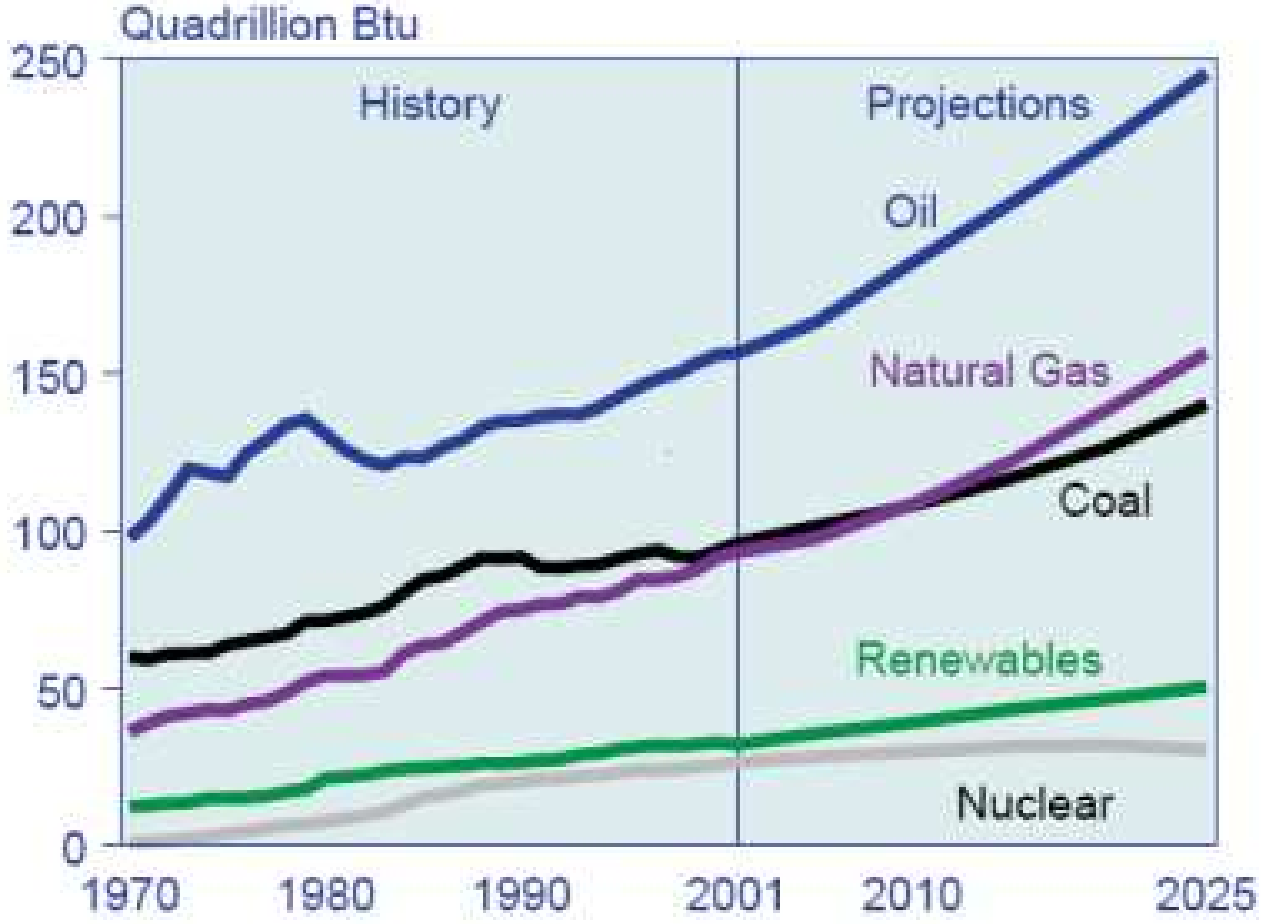
- http://www.lafoudre.com/berger/recupe.htm
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Foudre
- Imagination

3.3.2. Energies thermiques

- http://www.reussir-lait.com/actualites/energie-renouvelable-energie-gratuite-recuperer-la-chaleur-de-l-aire-paillee&fldSearch=:Q5GNZB7D.html
- Imagination

5. Annexes


Des choix qui engagent pour cent ans
Bientôt le Sud dépassera le Nord
Apprentissage rapide
Qui consomme ?
De Hongkong à Houston
Scénarios divergents
1990
2020
2060


Quadrillion Btu
250
200
150
100
50
0
History
Projections
Oil
Natural Gas
Coal
Renewables
Nuclear
1970
1980
1990
2001
2010
2025