

MENS :
une vision incisive
et éducative sur
l'environnement

Approche
didactique
et scientifique

37

Oct-Nov-Déc 07

Revue scientifique populaire trimestrielle

L'énergie en point de mire

Balisage d'une production d'énergie future

Milieu-
Education,
Nature &
Société

 Universiteit
Antwerpen

Loterie Nationale
créateur de chances 

MENS



Table des matières

L'énergie extraite du noyau d'un atome !	4
Et la fission alors !	4
Et quel était le problème alors ?	7
Et si au lieu de fissionner, nous fusionnions ?	8
Les biocarburants	10
Les cellules solaires	14
La force du vent	17
Du gaz oxyhydrique à la base pour l'économie : l'hydrogène	19
L'énergie émanant du cœur de la terre	20
L'eau aussi circule	22
Pas encore d'alternative instantanée ?	22
Et la lumière fut... ..	23

Avant-propos

Le professeur est le programme

Lorsque je confessais il y a peu à un collègue de biologie que l'historien de la littérature que je suis ne pouvait pas très bien se représenter en quoi consistaient ses recherches, il m'invita promptement à venir rendre visite à son équipe. Non seulement les petits gâteaux au chocolat s'avéraient-ils irrésistibles et le café bien meilleur que dans mon propre département, mais il m'a montré son laboratoire, le site d'essai comprenant les serres de plantes et les images satellite qui lui permettent d'étudier les effets de l'exploitation forestière en forêt amazonienne. Il m'expliqua comment son équipe était impliquée dans un projet international qui, en divers sites en Europe, essaie de dresser la carte des conséquences pour la végétation du réchauffement de la planète et comment, plus près de chez nous, ils analysaient l'invasion de plantes exotiques dans nos écosystèmes. Alors qu'il me présentait son travail avec un enthousiasme de plus en plus grand, je redevais l'écolier d'il y a quarante ans, suspendu aux lèvres de cet inoubliable professeur de néerlandais, qui voulait que la classe s'embrasse devant des poètes comme Paul Van Ostaïjen et Hugo Claus. "Quel métier merveilleux il a," pensais-je en moi-même. "Quel choix aurais-je fait à l'époque si un professeur de biologie aussi fantastique avait alors croisé mon chemin ?"

Pédagogues et didacticiens développent de nos jours des méthodes pour optimiser le processus d'enseignement, ils attendent des enseignants qu'ils formulent pour chaque leçon les objectifs à atteindre et des étudiants qu'ils cotent leurs professeurs sur une échelle d'un à cinq. Mais toutes les techniques didactiques et toutes les évaluations resteront sans effet si un professeur ne possède pas ces deux caractéristiques : des connaissances professionnelles approfondies, qui lui permettent d'enseigner avec maestria, et le désir de gagner ses élèves à sa cause. C'est pourquoi l'idée à la mode selon laquelle les élèves doivent accumuler des connaissances par eux-mêmes, de préférence à l'aide de l'ordinateur, et que les professeurs ne sont que des entraîneurs derrière la ligne de touche, fait problème. Tout comme est contestable l'opinion selon laquelle les meilleurs chercheurs doivent surtout se consacrer à la recherche, et qu'il est préférable de laisser l'enseignement dans les premières années aux chercheurs de second rang.

Dans un livre brillant sur l'enseignement aux onzième et douzième siècles, le germaniste américain C. Stephen Jaeger a résumé la conception que le moyen âge se faisait du professeur idéal en une seule phrase vertigineuse : "The teacher is the curriculum." Une telle maxime n'est bien sûr jamais entièrement exacte. Mais pour notre époque, où le professeur risque d'être réduit à un simple exécutant de principes didactiques concoctés par d'autres, elle contient une profonde sagesse. La passion que nous avons ressentie pendant nos

années d'école pour la littérature anglaise, la physique ou le théâtre est pratiquement toujours liée au souvenir reconnaissant de ce professeur qui a su nous toucher par son érudition et son enthousiasme. Voilà mes réflexions lorsque, sur ce site d'essai, j'entendis mon collègue m'expliquer avec ardeur pourquoi trois étudiants y lavaient si soigneusement des racines d'herbes dont je ne connaissais même pas le nom.



Frank Willaert
Institut pour l'Étude de la Littérature aux Pays-Bas
Université d'Anvers

Bio-
MENS

© Tous droits réservés Bio-MENS 2007

'MENS' est une édition de l'asbl Bio-MENS
A la lumière du modèle de société actuel,
elle perçoit une éducation scientifique
objective comme un de ses objectifs de base.

www.magazinemens.eu

Coördination :
Prof. Dr. Roland Caubergs
roland.caubergs@ua.ac.be

Rédacteur en chef et rédaction finale :
Dr. Geert Potters
mens@ua.ac.be

Rédaction centrale :
Lic. Karel Bruggemans
Prof. Dr. Roland Caubergs
Dr. Guido François
Lic. Liesbeth Hens
Dr. Lieve Maesele
Lic. Els Grieten
Lic. Chris Thoen
Dr. Sonja De Nollin

**Infos, abonnements, promotions
et relations extérieures :**
Corry De Buysscher
Te Boelaarlei 23, 2140 Antwerpen
Tél.: 03 312 56 56 – Fax: 03 309 95 59
Corry.mens@telenet.be

Abonnement:
€18 sur le numéro de compte 777-5921345-56
Abonnement éducatif: €10
Ou numéros distincts: €3,15
(moyennant la mention du numéro d'établissement)

Illustrations:
Pat O'Connell
ITER
Ginger Faes
Hilde Van Craen
AEI

Topic and fund raising :
Dr. Sonja De Nollin
Tél.: 0495 23 99 45 – Fax 03 609 52 37
sonja.denollin@ua.ac.be

Editeur responsable :
Prof. Dr. Roland Valcke
Reimenhof 30, 3530 Houthalen
roland.valcke@uhasselt.be



L'énergie en point de mire

Balisage d'une production d'énergie future

Ce dossier a été réalisé par
Dr. Geert Potters, Universiteit Antwerpen
avec la collaboration de
Prof. Oscar van der Borght, Universiteit Antwerpen
Frank van den Heuvel, Delta n.v., Middelburg, Nederland
Xavier van Kesteren, SolVin n.v.
Veronique Vets, Vlaams Energie-agentschap
Luc Dries, Directoraat-Generaal Leefmilieu

Dans les deux précédents numéros de MENS, nous avons porté attention particulière à la consommation d'énergie actuelle. Nous avons examiné la consommation d'énergie des hommes au fil de l'histoire, et comment il a tenté de répondre à ses besoins en énergie de différentes manières. Tout d'abord via sa propre force musculaire, ensuite en faisant appel aux animaux et depuis quelque cent cinquante ans, également en utilisant des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Ce n'était nullement un choix entièrement positif. En effet, les combustibles fossiles sont à la base du développement de l'industrie et du bien-être actuel, mais ils sont aussi liés à de grands problèmes environnementaux comme la pollution de l'air et le réchauffement de la terre. En outre, les stocks tels que nous les connaissons et sommes en mesure de les alimenter aujourd'hui ne nous permettront pas d'atteindre la fin de ce siècle. Heureusement, nous devons aussi directement ajouter que de nouvelles sources de combustible sont régulièrement découvertes et que par conséquent, ces prévisions peuvent encore partiellement être revues.

De plus, les sources d'énergie actuelle jouent un rôle important dans l'économie et la politique mondiale. Certainement lorsque nous examinons les stocks de combustibles fossiles d'un point de vue occidental. Nous avons en effet moins de stocks propres, et les stocks qui existent se trouvent dans des régions où la situation politique est parfois très instable. Nous pensons ici en effet au Moyen-Orient. Mais d'autres pays disposant de stocks importants (comme la Russie) n'hésiteraient pas à utiliser ceux-ci en cas de négociations politiques. Quelles qu'en soient les raisons. Il n'est donc absolument pas étonnant que l'Occi-

dent soit fortement enclin à tenter de pourvoir à ses propres besoins en énergie grâce à des technologies alternatives et novatrices... L'énergie est donc un problème mondial, ayant des implications scientifiques et sociales.

Nous pouvons naturellement nous montrer plus économes avec nos stocks d'énergie. Nos scientifiques et ingénieurs s'emploient activement à développer de nouveaux types de moteurs et appareils de chauffage, et à évaluer le concept de maisons passives. Vous aussi vous pouvez apporter votre contribution. Nous avons déjà bien étudié la question dans MENS 36.

Il faut toutefois encore travailler à l'établissement de solutions alternatives. Une production durable est bénéfique pour l'avenir de notre terre et son climat. L'énergie restera accessible à tous. Nous pouvons devenir (plus) indépendants des sources étrangères. Ces alternatives peuvent également nous permettre d'utiliser beaucoup plus efficacement l'énergie solaire. Bref, chacun est susceptible de trouver une raison de donner réellement une chance aux sources d'énergie alternatives.

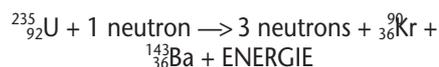
Dans ce numéro de MENS, nous allons présenter ces alternatives. Nous y ferons la lumière sur l'énergie nucléaire, tant sous sa forme actuelle (la fission des noyaux d'uranium) que sous la forme rêvée et propre de la fusion nucléaire. Ensuite, nous éclairerons également notre lanterne sur ce que l'on appelle les 'sources d'énergie alternatives', comme l'utilisation de matériaux biologiques, la force du vent, la lumière du soleil et l'hydrogène.

L'énergie extraite du noyau d'un atome !

Pour les amateurs de silhouettes originales : testez à l'occasion celles de Doel, avec la forme typique des tours de refroidissement de la centrale électrique (et pour ceux qui s'en approchent, le moulin sur la digue de l'Escaut). De l'autre côté du pays, un autre exemple : Tihange. De loin, on peut voir les volutes blanches qui s'échappent constamment des tours. Pour celui qui en doute – il s'agit bien de vapeur d'eau, exactement comme dans les autres centrales (même si elles ne sont pas nucléaires). Sans exagérer, ces centrales sont des moteurs importants de notre économie. En effet, 55 % de notre électricité sont générés dans une centrale nucléaire, et en ce sens, notre pays est un des leaders sur la scène européenne (voir figure). Pour la Belgique, l'énergie nucléaire est aujourd'hui déjà une alternative importante aux combustibles fossiles. Et l'on peut s'étendre longuement sur l'utilisation de l'énergie atomique, mais il n'en demeure pas moins que, par mégawatt / heure produit, une centrale nucléaire dégage beaucoup moins de CO₂ qu'une centrale au charbon. Bien vu, lorsqu'on pense à l'accord de Kyoto flottant au-dessus de nos têtes comme une épée de Damoclès. Cependant, une discussion très animée est menée dans de nombreux pays d'Europe concernant la suppression des centrales nucléaires comme source d'énergie. C'est le cas en Belgique également. Essayons de comprendre ce débat.

Et la fission alors !

Le combustible constitue le cœur même d'une centrale nucléaire. Il se compose d'uranium, l'uranium-235 (²³⁵U) et l'uranium-238 en étant les deux principaux isotopes sur terre. L'uranium était le premier élément qui se soit avéré fissionable. Nous entendons ici que certains isotopes de l'uranium ont un noyau instable. Lorsqu'un neutron entre en collision avec un noyau d'uranium-235, l'énergie de la collision effective est suffisante pour assurer la fission du noyau.



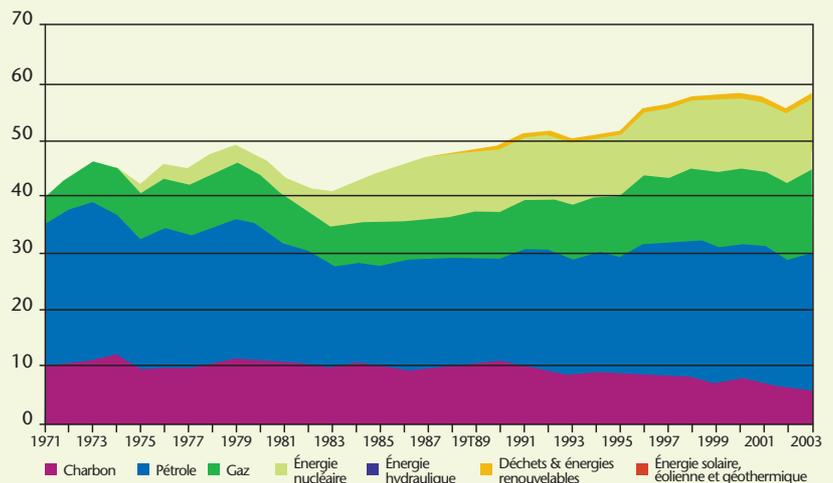
1 fission génère environ 3.10⁻¹¹ joule. Cela semble peu à première vue, mais... 1 kilomole d'uranium-235, soit 235 kg, peut fournir... 18 PJ. 235 kg de TNT génèrent 5 millions de fois moins d'énergie. En outre, les 3 neutrons qui sont libérés par la fission du noyau d'U-235 peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux d'U. Il en résulte alors une réaction en chaîne.

Énergie et électricité en Belgique

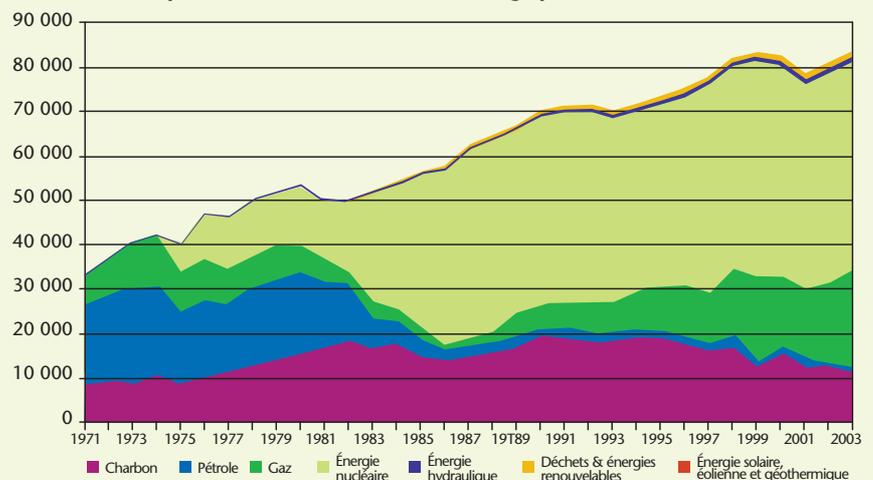
La société belge utilise différentes sources d'énergie. Dans l'ensemble (graphique du haut), notre principale source d'énergie est le pétrole (comme carburant pour les véhicules et pour nous chauffer). Mais si nous examinons à présent la production d'électricité uniquement (graphique du bas), les accents changent. Nous constatons en effet cette fois que la Belgique produit surtout du courant avec de l'énergie atomique (environ 55 %), et dans une moindre mesure avec du gaz naturel (26 %) et du charbon (14 %). Dans un cas comme dans l'autre, les sources d'énergie renouvelables ne jouent pas, elles, un rôle significatif...

Le même type de représentation peut être dessiné pour d'autres pays européens. Seule la mesure dans laquelle ces pays s'appuient sur l'énergie atomique diffère.

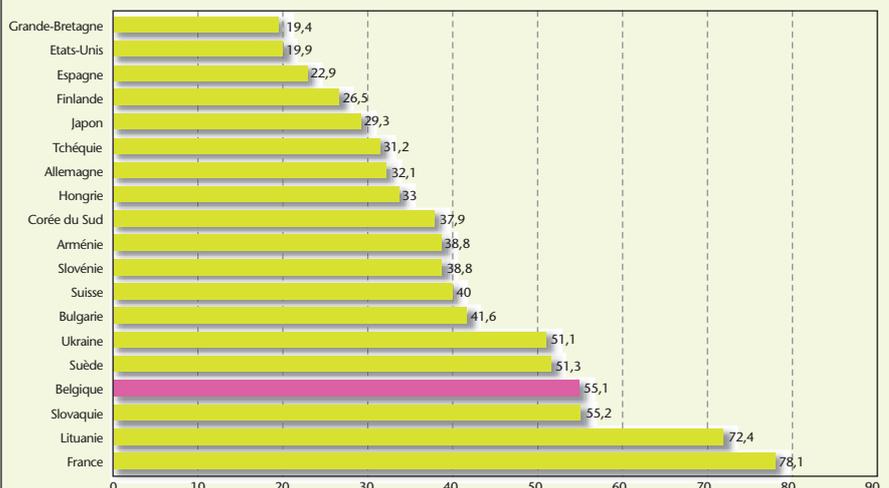
Évolution de l'utilisation de différentes sources d'énergie en Belgique

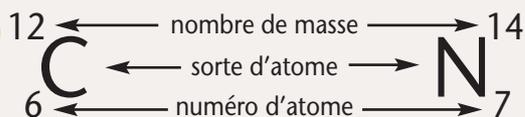
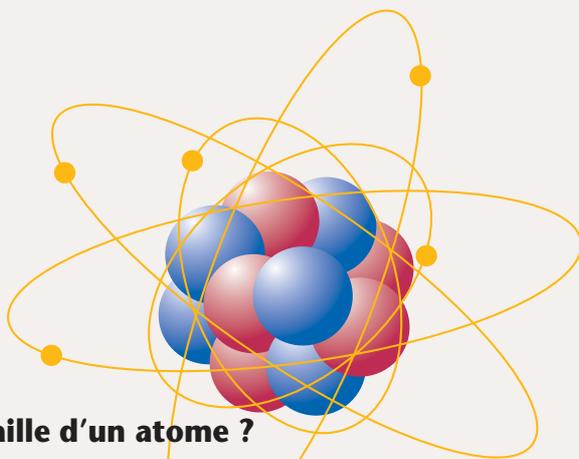


Évolution de la production d'électricité en Belgique



Pourcentage de la production d'électricité fondée sur l'énergie nucléaire





Quelle est la taille d'un atome ?

Une réponse brute tout d'abord. Un atome mesure environ 10^{-10} m, soit un dixième d'un millionième de millimètre.

Ensuite, la réponse détaillée. Si l'on examine un atome, c'est avant tout un espace vide que l'on voit, avec juste au centre, un fragment de matière. C'est le noyau de l'atome. Ce noyau lui-même présente un diamètre d'environ 10^{-14} m. C'est exactement comme s'il y avait une bille en plein milieu d'un terrain de football absolument vide par ailleurs (à quelques électrons près, encore plus petits).

Le noyau se compose du reste de particules encore plus petites : des protons et des neutrons. Les neutrons n'ont aucune charge, les protons présentent une charge positive. Dans l'espace autour du noyau, se déplacent les électrons, chargés négativement, présents en quantité identique à celle des protons dans le noyau, de sorte que le chargement de l'ensemble de l'atome est neutre. Le nombre de protons détermine le type d'atome (et tout ce qui en découle). Les atomes d'hydrogène ont un seul proton, le carbone en a six, et l'uranium (l'élément naturel le plus lourd présent sur terre), n'en présente pas moins de nonante-deux.

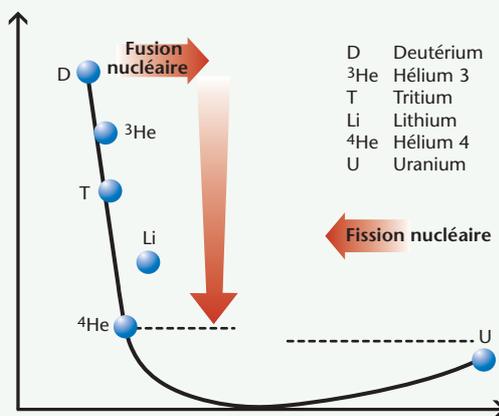
La masse de l'atome est surtout déterminée par les neutrons et protons (relativement) lourds ($1,6726231 \times 10^{-27}$ kg chacun). En effet, les électrons ont une masse 1800 fois plus petite. Le nombre de masse d'un atome est donc simplement la somme du nombre de protons et de neutrons dans le noyau. Le nombre de neutrons diffère d'un atome à l'autre, même au sein d'un même type d'atomes, et donc également le nombre de masse. Ainsi, il existe des atomes de carbone qui, en plus de leurs six protons, contiennent également six neutrons, mais d'autres par contre en ont sept ou huit. Nous parlons ainsi de carbone douze, carbone treize et carbone quatorze. Pour l'écrire en abrégé, nous utilisons le symbole du carbone, C, et nous plaçons en haut à gauche le nombre de masse. D'autre part, si nous voulons explicitement indiquer le numéro de l'atome (car nous décrivons des réactions où des éléments s'accordent mutuellement), on le place alors en bas à gauche du symbole. Voir la figure également. Ces atomes présentant un même nombre de protons, mais des nombres différents de neutrons dans leur noyau sont du reste appelés isotopes.

À propos des forces nucléaires fortes

Les forces nucléaires fortes sont les forces qui maintiennent ensemble les protons et les neutrons. En tant qu'ensemble, toutes les particules nucléaires rassemblées, le noyau se trouve à un niveau énergétique inférieur à celui des particules nucléaires prises séparément. Cette différence correspond à l'énergie de liaison. Lorsque deux noyaux légers sont fusionnés en un seul noyau plus lourd, il se peut que le nouveau noyau se retrouve à un niveau énergétique inférieur aux noyaux plus légers. L'énergie qui est alors libérée correspond à ce que nous espérons obtenir lors du processus de fusion du noyau. L'énergie des particules est du reste exprimée en physique nucléaire en électronvolts (eV) : $1 \text{ eV} = 1,60217653 \times 10^{-19}$ joule; $1 \text{ J} = 6,2415096 \times 10^{18} \text{ eV}$. D'autre part, un électronvolt correspond également à l'énergie que fournit un électron pour franchir une différence de tension de 1 volt.

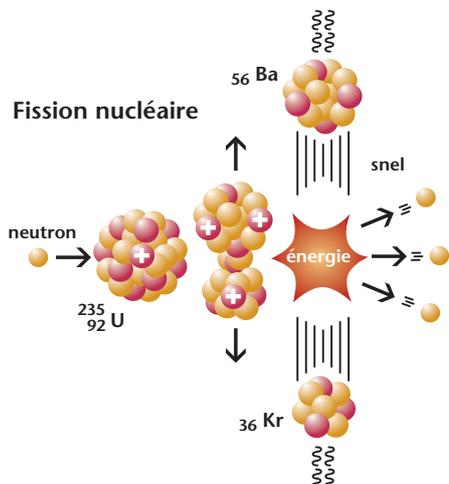
Plus la masse atomique d'un isotope déterminé est élevée, plus l'énergie de liaison libérée lors de sa formation est faible. À partir d'une masse atomique correspondant au fer-56, deux noyaux qui fusionnent se chargent à nouveau d'énergie supplémentaire. Il s'agit alors de l'énergie que nous pouvons libérer par la fission.

Ces mêmes forces nucléaires fortes sont du reste responsables de ce que la masse du noyau d'un atome est inférieure à la somme des masses des protons et neutrons pris séparément. C'est ce que l'on appelle le défaut de masse. En outre, cette perte de masse est proportionnelle à l'énergie de liaison... suivant la formule bien connue de Einstein : $E = mc^2$ (E est l'énergie, m est la masse et c et la vitesse de la lumière).



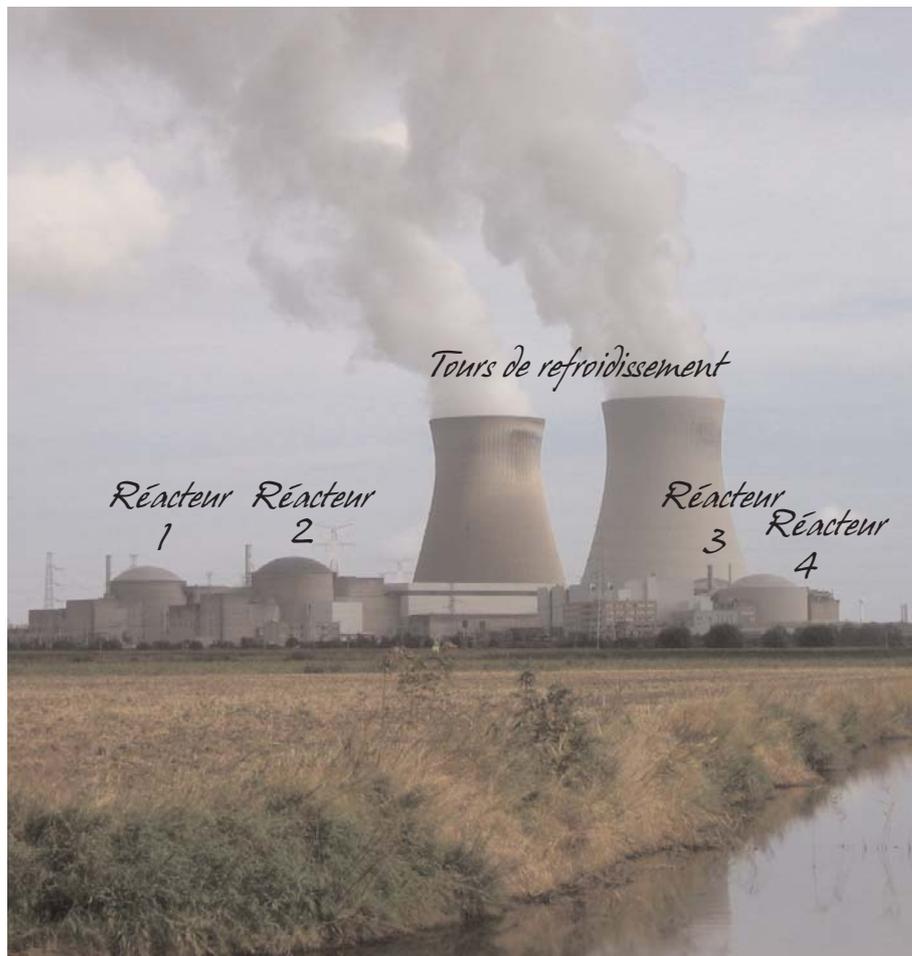
On peut comprendre ce principe comme si au moment de la fusion, une partie de la masse était transformée en énergie de liaison, qui est ensuite libérée. Lorsqu'on sépare le noyau, il faut donc au moins que la même quantité d'énergie soit ajoutée.

Grâce à cette relation entre la masse et l'énergie, nous pouvons également exprimer autrement les masses à l'échelle de l'atome. Un électronvolt peut également correspondre à une très petite quantité de masse : $1 \text{ eV} \sim 1,7826619 \times 10^{-36} \text{ kg}$; $1 \text{ kg} \sim 5,6095888 \times 10^{35} \text{ eV}$. La masse des particules est exprimée en uma (unité de masse atomique), qui est égale à $1/12$ de la masse de l'atome de carbone -12, mais peut aussi être exprimée comme suit : eV. $1 \text{ uma} \sim 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \sim 938,3 \times 10^6 \text{ eV}$. La masse du proton est alors par ailleurs de $1,0073 \text{ uma} \sim 938,3 \times 10^6 \text{ eV}$ et celle du neutron, $1,0087 \text{ uma} \sim 939,6 \times 10^6 \text{ eV}$. L'électron est ainsi défini comme très léger : $5,4859 \times 10^{-4} \text{ uma} \sim 511 \times 10^3 \text{ eV}$.



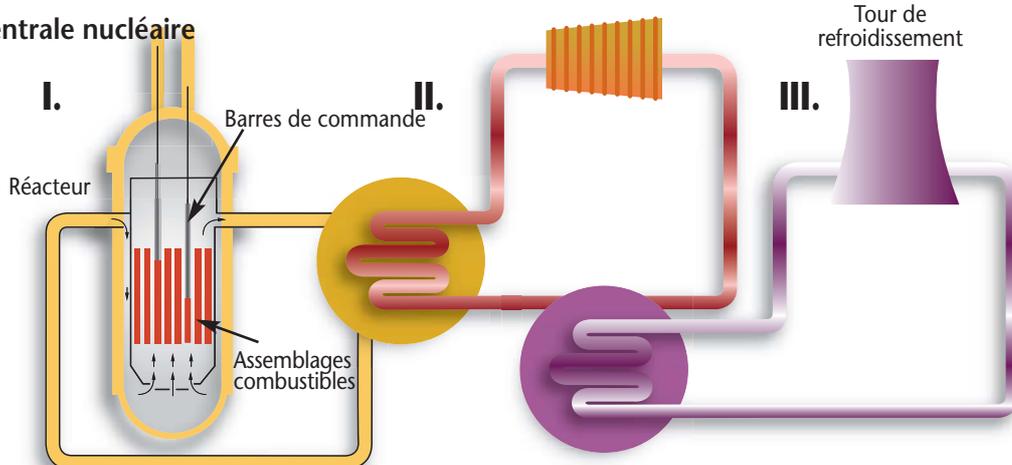
La réaction ci-dessus n'est du reste pas la seule possible. Par un bombardement de neutrons moins riches en énergie (et donc 'plus lents'), l'isotope d'uranium-235 se transforme en uranium-236, dont la durée de vie est très courte et qui se décompose immédiatement en deux noyaux d'atomes plus petits, en libérant de l'énergie et encore plus de neutrons. Ces neutrons peuvent également déclencher une réaction en chaîne, et donc entraîner la fission d'autres noyaux d'uranium.

Ces propriétés rendent l'uranium-235 fondamental comme matière fissile dans les réacteurs nucléaires : cette fission est simple à provoquer, produit beaucoup d'énergie et se maintient elle-même, et il y a sur terre une quantité substantielle d'uranium-235.



Fonctionnement d'une centrale nucléaire

- I. Circuit primaire
- II. Circuit secondaire
- III. Circuit tertiaire

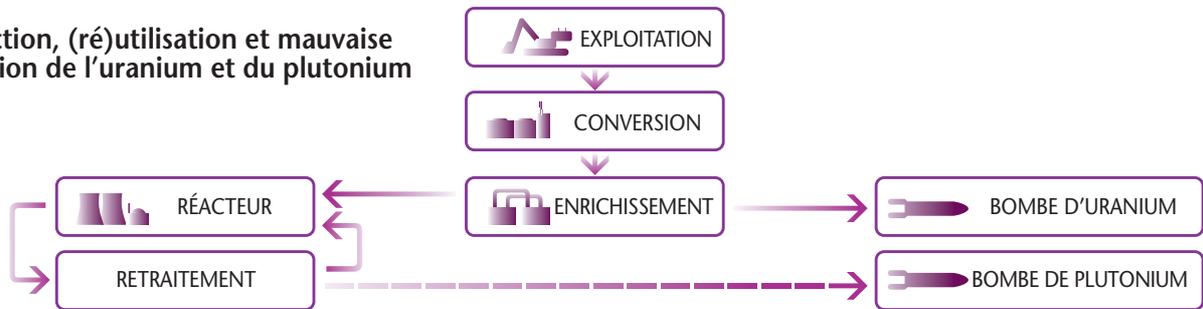


La figure ci-dessus représente le schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire. Dans la cuve du réacteur se trouvent les différents assemblages combustibles. Entre les éléments de matière fissile, se trouvent des barres de commande composées de cadmium. Lors du processus de fission, la réaction en chaîne qui est induite peut fortement s'écarter de la normale. Pour éviter cette situation, les barres de commande absorbent les surplus de neutrons résultant de la fission et la réaction en chaîne est ainsi maintenue sous contrôle. À Tchernobyl, une erreur s'est produite avec ces barres de commande et celle-ci a littéralement entraîné l'explosion du réacteur et sa coupole (ainsi qu'une partie de son contenu) s'est envolée dans l'air, avec toutes les conséquences que cela entraîne. Dans des circonstances normales, avec l'énergie libérée, l'eau est transformée en vapeur. Cette réaction se produit après le transfert de la chaleur du circuit primaire vers le circuit secondaire. Avec cette vapeur, il est possible de faire tourner une

turbine, et donc de produire de l'électricité.

L'excès de vapeur dans le circuit secondaire est à nouveau condensé à l'aide de l'eau froide du circuit tertiaire, relié aux tours de refroidissement (D). Naturellement, cette eau reste dans le circuit secondaire, car ici aussi, il est question de contact indirect. De cette façon, aucune eau ayant été en contact avec les barres radioactives ne s'échappe vers le monde extérieur. L'eau dans le circuit primaire entre en contact avec les éléments d'uranium, et est donc très fortement radioactive. L'eau du circuit secondaire, avec l'eau de condensation avant et la vapeur après l'échangeur de chaleur (B) n'entre qu'à elle qu'en contact indirect avec l'eau radioactive et n'est donc pas radioactive, et il en va de même pour le circuit tertiaire. La vapeur que vous voyez s'échapper des tours de refroidissement provient donc également toujours de ce circuit tertiaire d'eau de refroidissement.

Production, (ré)utilisation et mauvaise utilisation de l'uranium et du plutonium



Et quel était le problème alors ?

À première vue, l'utilisation de l'énergie nucléaire présente un certain nombre d'avantages évidents. Elle ne libère pas de CO₂ ou d'autres polluants atmosphériques (soit un bonus supplémentaire en ce qui concerne les limitations de notre émission de CO₂). Certains sous-produits de la réaction sont très importants en médecine. En outre, on ne prévoit aucune pénurie d'uranium fissile (en tout cas pas à court terme). Et à plus long terme, on examine la possibilité d'extraire l'uranium de l'eau de mer, ce qui, selon certaines sources, nous assurerait encore des milliers d'années d'énergie. D'un point de vue géopolitique, un gros avantage est que la matière première de l'uranium provient en grande partie de pays comme le Canada et l'Australie, soit des pays plus stables que la Russie et le Moyen-Orient, d'où sont originaires le pétrole et le gaz.

Mais surtout – un réacteur nucléaire génère moins de déchets : quelques mètres cubes de déchets seulement pour un gigawatt / an. Néanmoins, ces déchets constituent précisément le talon d'Achille du réacteur nucléaire. En effet, cette petite quantité de déchets est hautement radioactive, et tant l'uranium lui-même que les produits créés lors de la fission des noyaux d'uranium sont des métaux lourds toxiques. Après 600 ans, les déchets produits par les réacteurs ne ser-

ont pas plus radioactifs que certains minerais naturels. Mais bien que la chaîne de désintégration de l'uranium et des deux produits de la fission ne libère qu'une faible radiation, une exposition prolongée peut engendrer des risques graves pour la santé. Et dans une perspective plus longue – les déchets doivent encore être suivis pendant des milliers d'années. Tout d'abord, les barres de combustibles utilisées sont refroidies pendant quelques années dans des cuves de stockage. Ensuite, les déchets sont emmenés vers une zone de stockage de surface, pour ensuite être définitivement stockés dans une galerie souterraine. Par ailleurs, l'une des principales composantes de ces déchets est le plutonium, qui surgit de l'uranium via la réaction secondaire suivante :



Le plutonium est un élément hautement radioactif qui à proprement parler, n'est plus présent sur terre. Ce plutonium est cependant à la base d'une réutilisation éventuelle des déchets, en le transformant en un combustible appelé MOX. MOX est l'abréviation de Mixed Oxide, et est un mélange d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium. Le remplacement d'un élément combustible d'uranium standard par un élément MOX consomme 9 kg de plutonium au lieu d'en produire 5 kg. À première vue, cela semble être une solution positive : nous laissons donc à nouveau tomber le plutonium (puisqu'e, ainsi, nous réutili-

ons les déchets de la centrale), en retirons encore de l'énergie, et nous pouvons ainsi être encore plus économes avec nos stocks d'uranium. Mais d'autre part, la création de MOX requiert le traitement (et souvent le transport) d'importantes quantités de plutonium, soit un élément particulièrement toxique et une forte source de radioactivité. Le déversement de plutonium pourrait entraîner des dégâts encore plus graves pour l'environnement que s'il s'agissait de simple uranium.

Du reste, il n'y a pas que les déchets de la réaction elle-même qui doivent être traités avec toute la prudence nécessaire. Les restes de la centrale nucléaire, lorsque la production est définitivement interrompue, doivent également être démontés et stockés avec la plus grande prudence. Actuellement, selon un certain nombre de savants, les déchets peuvent parfaitement être entreposés dans des couches géologiques stables et très profondes : les couches salines (comme on en a découvert en Allemagne), du granite (comme en Scandinavie) et l'argile (Suisse, France et Belgique). Mais malheureusement, personne ne veut de déchets dans son jardin et les habitants d'une commune où les autorités envisagent l'installation de dispositifs de stockage protestent et s'y opposent violemment.

Une centrale nucléaire en activité constitue également une source de dangers. Un accident peut entraîner le déverse-

Je démissionne

À la lumière de tous les inconvénients de l'énergie nucléaire, le gouvernement belge a décidé en 2003 de suspendre l'approvisionnement en électricité à l'aide de centrales nucléaires. Les centrales âgées de 40 ans doivent être irrévocablement fermées et ne seront pas remplacées par de nouveaux modèles. Et oui, conformément à cette décision, les premières centrales fermeront en 2015, et le courant nucléaire sera définitivement tari en 2025. Sous-entendu, si aucun problème ne surgit. La loi en question prévoit en tout cas que la suppression de l'énergie nucléaire peut être suspendue si le pays doit faire face à des pénuries en termes d'approvisionnement en électricité. Et il s'agit là d'une disposition que les politiciens pourraient interpréter très largement, le cas échéant.



ment de matériau radioactif dans l'environnement. Rappelez-vous ce qui s'est passé à Tchernobyl. Les partisans argumentent que les mesures de sécurité nécessaires sont prises lors de la conception des centrales modernes. En effet, quelques centaines de centrales nucléaires sont opérationnelles de par le monde et jusqu'à présent, un nombre limité 'seulement' a rencontré des accidents. Les 10 000 morts chaque année dans les mines de charbon contrastent nettement avec la situation. D'autre part, Tchernobyl était une centrale dépassée datant des années '50 dans une société où la sécurité était secondaire.

Ces dernières années, indépendamment du processus de production lui-même, il est aussi devenu douloureusement clair qu'un autre grand danger est lié aux centrales nucléaires : les produits peuvent servir comme matière première pour des armes nucléaires, et certaines organisations terroristes seraient assez contentes de se procurer un chargement d'uranium ou de plutonium, pour pouvoir créer une 'bombe sale' (une bombe susceptible, en cas d'explosion, de contaminer de façon radioactive tout un quartier, une ville, une région...).

Résumé – la fission nucléaire n'engendre aucune émission de dioxyde de carbone, et les centrales occidentales sont beaucoup plus sûres. Seul le combustible, l'uranium, est présent en quantité limitée sur la terre. Du reste, les déchets produits restent longtemps radioactifs et il n'existe aucune solution évidente à ce sujet. La fission nucléaire n'est pas pleinement positive pour l'humanité. Mais cela veut-il dire que l'énergie nucléaire n'a vraiment pas d'avenir ?

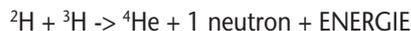
Absolument pas. La nouvelle génération de centrales nucléaires fonctionnera suivant un système de production entièrement revu. Les nouvelles centrales nucléaires sont supposées offrir un haut rendement en termes de production d'électricité et de chaleur, le plutonium et les autres déchets sont recyclés et l'uranium naturel est pleinement utilisé. De plus, ces réacteurs pourraient également être utilisés pour d'autres processus : la production d'hydrogène (voir plus loin), ou le dessalement de l'eau de mer. Seul subsiste un petit problème... ces réacteurs ne devraient être mis en service de façon commerciale qu'au cours de la période 2025-2040.

En outre, il n'est pas uniquement question de fission nucléaire. C'est ce que nous allons aborder dans le chapitre suivant...

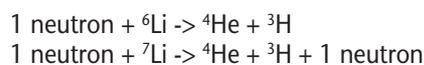
Et si au lieu de fissionner, nous fusionnions ?

Outre la fission nucléaire, ingénieurs et scientifiques étudient également un autre processus permettant d'utiliser l'énergie des noyaux des atomes pour notre approvisionnement en énergie : la fusion nucléaire. Il s'agit de la fusion de plusieurs noyaux d'atomes légers en un nouveau noyau. C'est plus facile à dire qu'à faire : les noyaux des atomes sont chargés positivement, et le fait de faire fusionner deux particules positives pour permettre une réaction de fusion requiert beaucoup d'énergie. Dans le soleil, où toute énergie résulte de la fusion de noyaux d'atomes, cela se passe en présence d'une énorme pression et à quelque 15 millions de degrés. Sur la terre, nous ne pouvons atteindre cette forte pression et par conséquent, la température doit encore être 10 fois supérieure : soit quelque 100 à 200 millions de degrés. Et donc, cet investissement devrait se porter garant d'une énorme production d'énergie.

Nous devons tout d'abord ce processus aux importantes forces nucléaires (voir l'encadré à la p. 5) La réaction de fusion s'étant avérée la plus simple à réaliser sur terre jusqu'à présent utilise deux isotopes d'hydrogène : le deutérium (^2H) et le tritium (^3H). La réaction qui se produit alors dans le réacteur de fusion nucléaire est la suivante :



Un noyau d'hélium et un neutron sont produits. Le deutérium est présent en grandes quantités dans l'eau. Selon certaines sources, il est possible d'extraire d'un litre d'eau de mer autant d'énergie que dans quelque 300 litres d'essence et l'équipe derrière le récent consortium international ITER (voir plus loin) prétend qu'on pourrait extraire du lac de Genève suffisamment de deutérium pour alimenter en énergie toute l'humanité pendant des milliers d'années. Selon la réaction nucléaire ci-dessous, le tritium peut être obtenu à partir de deux isotopes de lithium, qui se dégagent comme sous-produit lors du dessalement des eaux de mer, et ce processus se produit durant la réaction :



En guise d'exemple concret, si nous prenons le lithium d'une pile d'un ordinateur portable et le deutérium de 45 litres d'eau, nous pouvons produire 200 000 kWh d'électricité, soit autant qu'avec 40 tonnes de charbon. Aurions-nous ainsi trouvé une source pratiquement inépuisable

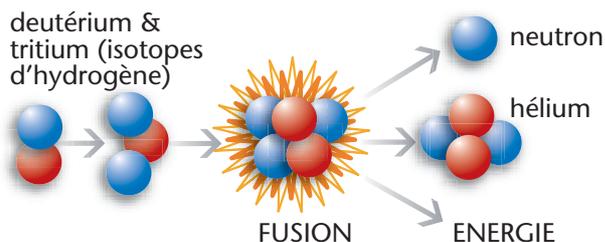
d'énergie ? C'est bien ce qu'il semble.

Toutefois, nous en avons déjà cité le plus gros problème : la réaction ne peut se produire que si nous atteignons une température d'au moins 100 millions de degrés. À pareille température, la matière n'existe plus du reste dans un des états physiques connus (solide, liquide, gazeux), mais prend une quatrième forme : le plasma. En cet état, certains atomes, par exemple suite à la hausse de température, ont perdu un ou plusieurs électrons. Ces électrons libérés se déplacent librement dans l'espace et le noyau qui subsiste (avec les électrons éventuellement restés) est devenu un ion positif.

Pour pouvoir maîtriser ce mélange de particules chargées électriquement, on utilise des champs magnétiques puissants présentant une forme particulière : le torus. Un réacteur de ce type est appelé un tokamak. Il s'agit d'un acronyme basé sur les termes russes toroidalnaja (sous forme de torus), kamera (espace), magnitnaja (magnétique) et katoesjkan (bobine) ; les premiers chercheurs s'étant intéressés à ce type de réacteurs étaient en effet russes (notamment le prix Nobel de la paix Andrei Sacharov). Le maintien du plasma à l'aide d'un champ magnétique présente deux gros avantages : le plasma n'est pas refroidi par la paroi beaucoup plus froide, et la paroi elle-même n'entre pas en contact avec le plasma chaud et reste donc intacte. Naturellement, il faut investir suffisamment d'énergie pendant la réaction pour garder intact le champ magnétique. Cette énergie doit donc être déduite du rendement du réacteur.

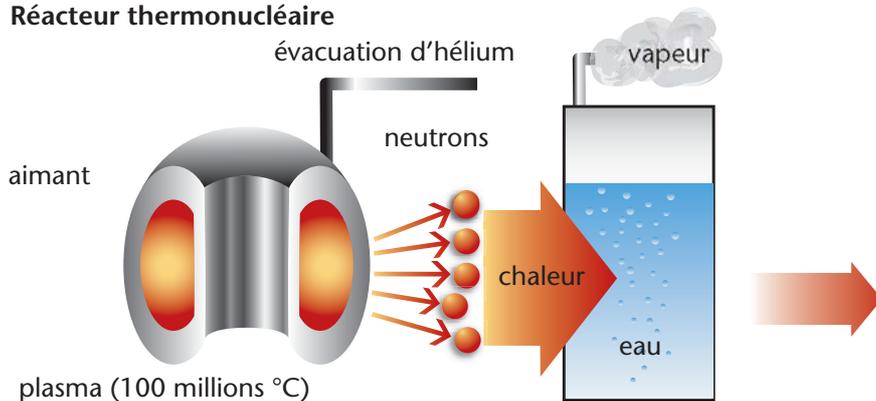
D'autre part, cette haute température est surtout nécessaire pour déclencher la réaction. Une fois le processus de fusion en cours, la réaction libère des neutrons et des noyaux d'hélium. Étant donné que les noyaux d'hélium sont chargés, ils ne peuvent s'échapper du champ magnétique. Ces particules se heurtent contre les noyaux de deutérium et de tritium dans le mélange plasma et garantissent ainsi le maintien de la température dans le réacteur. Comme le plasma se maintient ainsi par lui-même, le réacteur est 'alimenté'. Étant donné que les neutrons ne sont pas chargés, ils ne sont pas non plus retenus par le champ magnétique du tokamak. Ils s'échappent et viennent se heurter contre les parois du réacteur, composées de lithium. Il se forme ainsi directement plus de tritium, qui peut être ajouté comme combustible au mélange de réaction ; en outre, cette collision engendre de la chaleur. Celle-ci peut être transmise à une enveloppe réfrigérante remplie d'eau. Il en résulte de la vapeur, qui peut alors

Fusion nucléaire



entraîner une turbine. Nous obtenons ainsi de l'électricité.

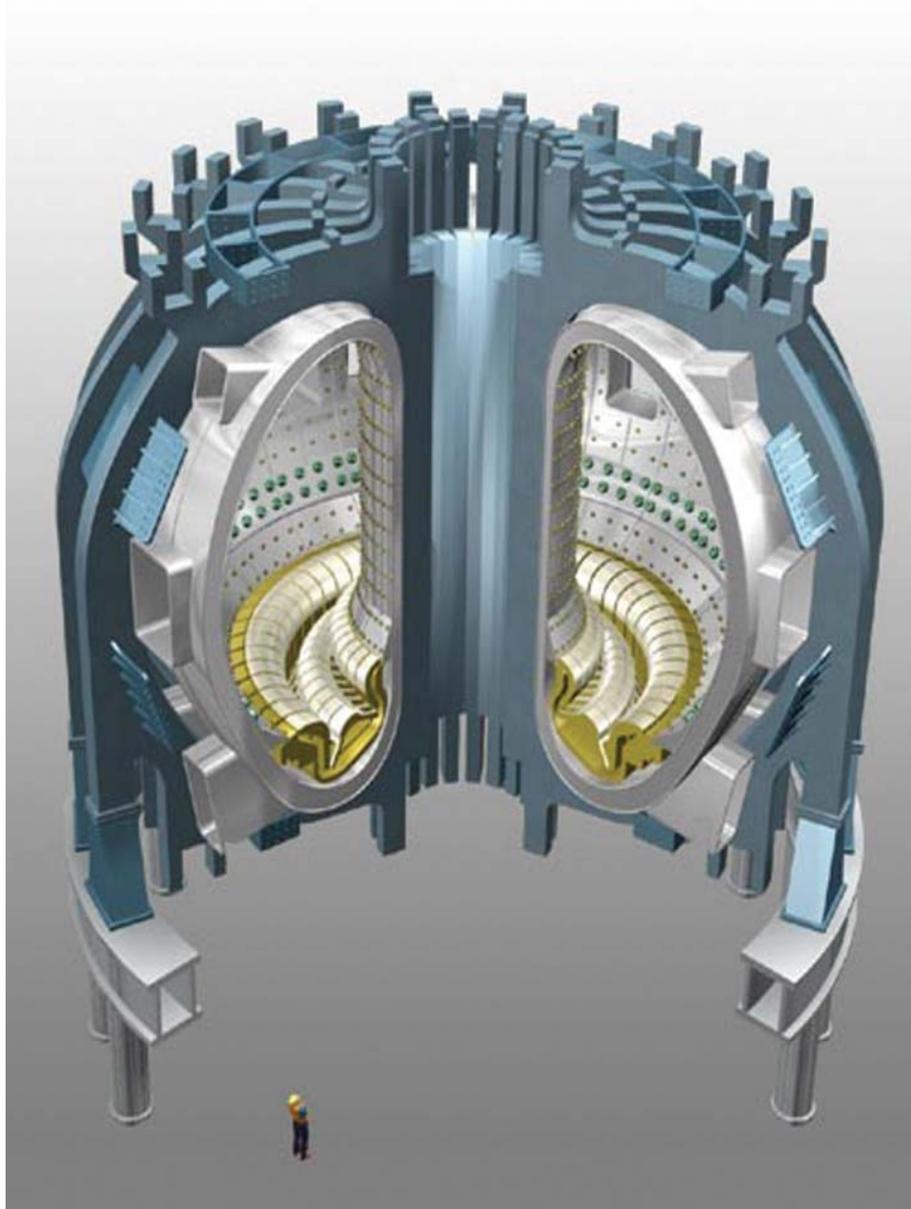
Réacteur thermonucléaire

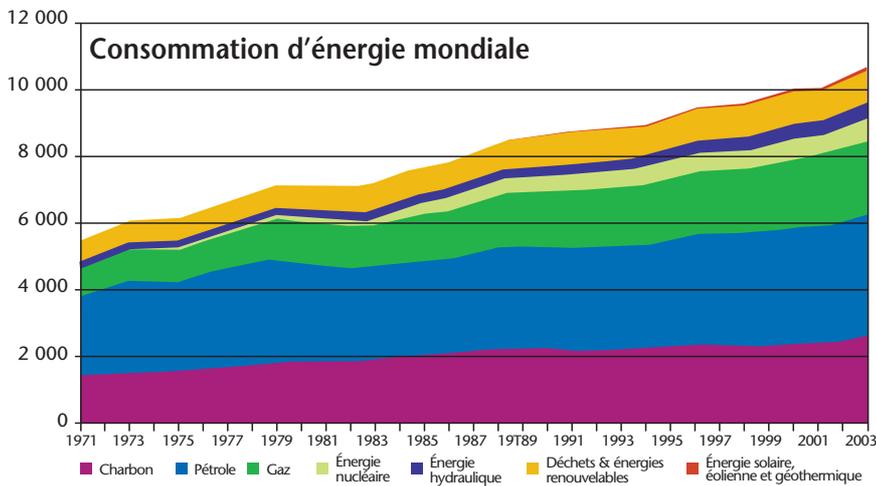


Les principaux avantages de la fusion nucléaire sont qu'il en résulte peu de déchets radioactifs, et qu'il n'y a jamais qu'une petite quantité de réactif nucléaire dans le réacteur. En outre, comme nous l'avons déjà indiqué, les matières premières sont pratiquement inépuisables. Un inconvénient est toutefois que même la plus petite installation permettant une exploitation rentable doit déjà être assez grande, mais ça, nous pouvons peut-être en prendre notre parti. Rien que des bonnes nouvelles. Alors, pour quand peut-on s'attendre à disposer de cette masse de courant bon marché ?

En fait, différents tokamaks sont disponibles dans le monde – pour la recherche uniquement, pas encore pour produire réellement de l'énergie. Ainsi, le Naka Fusion Research Establishment à Nakamachi, au Japon, possède le Tokamak-60, qui a pu atteindre en 1996 une température de 520 millions de kelvins. Il s'agit de la température la plus élevée que l'homme n'ait jamais pu générer. En Grande-Bretagne se trouve le JET (Joint European Torus), un tokamak géré par une équipe de recherche européenne. Jusqu'à présent, ces installations sont déjà parvenues à déclencher une fusion nucléaire (une bonne nouvelle jusque-là), mais elles n'ont pas encore été en mesure de produire juste ce qu'il faut d'énergie pour maintenir le réacteur en activité. D'un point de vue purement économique, la production d'électricité à l'aide de réacteurs de fusion n'est donc pas encore possible. Entre-temps, des négociations sont menées entre la Corée du Sud, la Russie, la Chine, les USA, le Japon, l'Inde et l'UE pour construire un grand tokamak à Cadarache, en France. Vers 2015, l'ITER devrait démontrer la possibilité d'une fusion nucléaire économiquement rentable, en produisant 10 fois plus d'énergie que ce que la centrale elle-même consomme. Et quand ce courant de fusion sortira-t-il de nos prises de courant ? Eh bien... au plus tôt dans trente ou quarante ans...

En résumé ? Il y a de l'espoir. Et l'espoir fait vivre. Nous espérons que cela durera assez longtemps.





Les biocarburants

Si nous examinons un instant la figure ci-jointe relative aux sources d'énergie rencontrées de par le monde, nous constatons qu'environ dix pour cent de toute l'énergie du monde proviennent de 'sources renouvelables et déchets'. Ma foi. Cela signifie surtout que beaucoup d'arbres encore sont abattus. Des arbres qui ne sont pas replantés – pensez notamment à la consommation des forêts équatoriales. Ce n'est pas non plus une solution vraiment durable. En outre, les arbres, avec leurs racines, maintiennent le sol fertile. Lorsque les arbres sont abattus, une averse peut emporter toute une partie de ce sol fertile, et donc l'appauvrir. Ce n'est donc pas parce que l'énergie provient de sources renouvelables qu'elles puisent automatiquement leur origine dans des sources renouvelées.

Pour plus de clarté – nous n'aborderons PAS ce sujet dans le cadre de ce numéro, mais parlerons plutôt des formes d'énergie qui sont effectivement renouvelées, par ex. des arbres qui ont été replantés (et ne sont abattus que lorsqu'ils ont donné autant de bois que ce qui a été brûlé au départ). En effet, si nous voulons utiliser plus de biomasse pour produire de l'énergie vraiment renouvelable, nous devons le faire de manière durable.

Néanmoins, il existe différentes possibilités pour faire d'un matériau biologique (biomasse) une source d'énergie durable. Finalement, les plantes ont surtout besoin de lumière, de CO₂, d'eau et d'un peu d'engrais pour grandir, et nous disposons certainement de ces deux premiers éléments en abondance. D'autre part, les plantes sont déjà des fournisseurs d'énergie dans la nature, comme nourriture pour l'homme ou l'animal ; pourquoi ne pourrions-nous pas également les utiliser comme carburant ?

Ce carburant peut prendre plusieurs formes. Souvent, le matériau produit sera brûlé dans une centrale thermique, de manière à produire de l'électricité. D'autres matières premières biologiques se prêtent à la formation de biodiesel ou bioéthanol, permettant à certains moteurs de tourner.

Les principales sources de biomasse sont le vieux bois, les résidus de bois et le bois de déchets de la sylviculture d'une part, et les cultures énergétiques 'fraîches' d'autre part. Parmi ces cultures énergétiques, on établit encore une importante distinction entre les cultures arables traditionnelles (voir plus loin) d'une part et les plantations de ligneux, comme le peuplier, le saule et l'eucalyptus d'autre part. Ces derniers sont sélectionnés pour produire rapidement une grande quan-

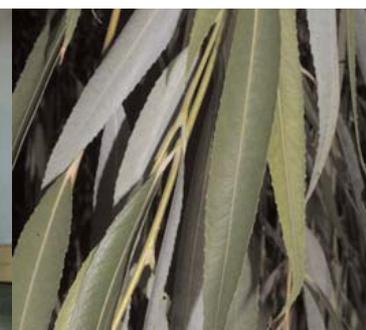
La biomasse : une énergie biologique durable ?

Par biomasse, nous entendons :

- tous les matériaux organiques d'origine végétale ou animale
- qui ne sont pas destinées à être mangées, mais bien à des applications industrielles
- ou pour la production d'énergie (chaleur, électricité, carburant moteur).

En outre, il s'agit de matériaux qui ont été produits de manière durable. En d'autres termes, il a été veillé à ce que la source de biomasse soit maintenue en l'état, et ne soit pas épuisée. Dans ce numéro, nous nous sommes naturellement intéressés à la dernière application : la production d'énergie.

Pour en savoir davantage sur les autres applications de la biomasse, reportez-vous au numéro MENS 25, *La biomasse, une matière première verte*.



Les petits ruisseaux font les grandes rivières. Les bus de De Lijn roulent consciemment avec un mélange de diesel ordinaire et de biodiesel. Le bois à brûler est jusqu'à aujourd'hui le carburant idéal pour le chauffage par biomasse à la

campagne. Dans les villes, on lui préfère les pellets de bois ou le biogaz. Cependant, le bois à brûler peut également être rentable dans une ville : dans un certain nombre de grandes villes, comme Helsinki, des projets ont cours où les habitants de la

ville se voient livrer du bois à brûler dans de petites quantités, facilement stockables. La consommation est contrôlée numériquement et la date de livraison la mieux adaptée est fixée automatiquement.



Un inconnu au bataillon ?

Quelques cultures moins connues sont également en vogue comme sources éventuelles de la bioénergie. L'une d'entre elles est la culture asiatique de l'herbe à éléphant (le *Miscanthus*). Celui-ci appartient, tout comme la canne à sucre et le maïs, à la famille des graminées. D'un point de vue physiologique, le *Miscanthus* est une culture dite C4. La photosynthèse de ces plantes se déroule via un acide dicarboxylique avec quatre atomes de carbone, souvent de l'acide malique. Ces plantes peuvent fixer beaucoup de carbone par quantité de lumière reçue. Cette culture pluriannuelle atteint une hauteur de 3,5 m maximum en une seule saison de croissance, et son rendement peut aller jusqu'à 25 tonnes par hectare. Elle peut être récoltée chaque année. Par rapport aux plantes agricoles traditionnelles, le *Miscanthus* présente un besoin nettement inférieur en engrais azoté et l'agriculteur doit tout juste prévoir un apport en insecticide et herbicide. Une autre culture d'avenir est le bambou, ou plutôt, les bambous, car il en existe plus de 1000 variétés différentes. En occident, nous connaissons surtout les plantes de bambou comme des plantes de jardin, mais de nombreuses autres applications utiles sont concevables. Le bambou dispose d'une tige ligneuse (et plutôt sèche), se développe rapidement et est vivace, de sorte qu'un producteur de bambous peut fournir de la biomasse toute l'année. La plante développe des rejets depuis une souche souterraine. Au moment de la récolte, celle-ci reste en place, de sorte que l'année suivante, de nouveaux rejets peuvent apparaître.

Miscanthus, bambou

tité de bois et de matériau ligneux, qui peuvent alors être brûlés pour produire du courant. On parle dans ce cas de cycle court du bois.

Du courant vert au départ des plantes

Pour être utilisable pour la production d'électricité, la biomasse doit cependant satisfaire à un certain nombre de critères. Naturellement, nous voulons une plante qui grandit vite ; de manière à pouvoir produire beaucoup de biomasse. Mais elle doit aussi pouvoir être cultivée facilement. Nous cultivons de préférence encore des variétés que nous ne devons pas replanter chaque année, mais dont la souche peut se développer à nouveau.

Étant donné que nous utilisons de l'électricité toute l'année, nous préférons des plantes qui poussent également en hiver, ou des plantes qui peuvent être facilement récoltées et entreposées. En outre, nous voulons obtenir le plus de chaleur possible de la combustion de ces plantes.

Pour ce faire, le matériau doit de préférence être aussi sec que possible. Toute l'énergie qui sert encore pendant la combustion à faire évaporer l'eau dans le matériau végétal, ne peut pas en effet être utilisée pour fabriquer du courant. Les feuilles sont par exemple moins adaptées que les branches. Et enfin, nous aimerions une variété de biomasse qui se transporte facilement et efficacement du champ à la centrale électrique. Les éclats et les pellets de bois occupent par exemple moins de volume que des branches bicornues, et se voient dès lors souvent accorder la préférence. Une technique relativement nouvelle et qui présente d'ores et déjà bon nombre d'avantages est la torréfaction, à savoir, le grillage du bois, à des températures allant de 250 à 300 °C. La torréfaction de la biomasse réduit la teneur en humidité et augmente la valeur calorifique du bois. En outre, le bois est alors relativement cassant, et peut dès lors être facilement transformé en pellets ou en poudre. En effet, la poudre et les pellets sont plus faciles à transporter. La source idéale de biomasse

est donc une plante qui réponde au mieux à tous ces critères. Les plantes sont également sélectionnées en fonction.

Et que se passe-t-il alors avec la fumée de la combustion ? Alors que le charbon se compose presque uniquement de carbone, les plantes fraîches contiennent encore certaines quantités d'azote et de soufre. Lors de leur combustion, des gaz tels que NO, NO₂ et SO₂ se forment également et sont susceptibles de mener à la formation de pluies acides. Pour éviter cela, scientifiques et ingénieurs travaillent assidûment à des systèmes tendant à empêcher l'émission de ces gaz.



Les principales sources du cycle court du bois sont le saule et le peuplier. On plante de 10.000 à 20.000 plants de ces variétés par ha et ceux-ci sont récoltés après trois à cinq ans.

Les cultures arables populaires pour une production d'énergie sont le tournesol, la canne à sucre, la betterave sucrière, le colza, la jacinthe d'eau, des variétés de céréales hybrides, le millet sucré et le chanvre textile. Les cultures énergétiques qui sont de plus en plus en vogue sont le saule, le peuplier, le bambou et le *Miscanthus* (herbe à éléphant).

Et quelle est alors la situation en ce qui concerne le carbone ?

Et quel est à présent le résultat de toutes ces démarches ? Ne produisons-nous plus de dioxyde de carbone en brûlant du bois ? Mais si. Par kilo de carburant, quelle qu'en soit l'origine, nous émettons environ 1,8 kilo de CO₂. Qu'il s'agisse de pétrole ou de rameaux de saule. La seule différence est que, dans le cas du pétrole, nous brûlons des matières contenant du carbone ayant été formé il y a des millions d'années. Chaque milligramme de carbone que nous envoyons à ce moment dans l'air sous la forme de dioxyde de carbone, n'y a plus eu sa place pendant tout ce temps. Mais lorsque nous consommons des composés du carbone jeunes et nouveaux (car le morceau de plante que nous brûlons a tout au plus un an), et que le dioxyde de carbone qui en résulte est à nouveau fixé par les plantes de la génération suivante, il s'agit alors d'une opération nulle.

Toutefois, cette vision est très optimiste. En effet, nous ne vivons pas dans une société ayant renoncé à tous les produits dérivés du pétrole, nous avons besoin d'essence ou de diesel pour faire fonctionner les machines de récolte ou les camions pour le transport. Pour ne citer que les producteurs les plus évidents de dioxyde de carbone dans toute la chaîne du processus. Il faut également tenir compte du fait que la culture de plantes pour obtenir du carburant chasse d'autres plantes (par ex. pour l'alimentation), alors que celles-ci absorberaient également du CO₂.

Un processus de production d'énergie sur la base d'une biomasse, où le bilan quantitatif de CO₂ est nul, relève donc lui aussi momentanément du rêve. Mais il réduit malgré tout les émissions nettes de CO₂, et les petits ruisseaux font les grandes rivières...

Et qu'en est-il de ma cuisinière à gaz ?

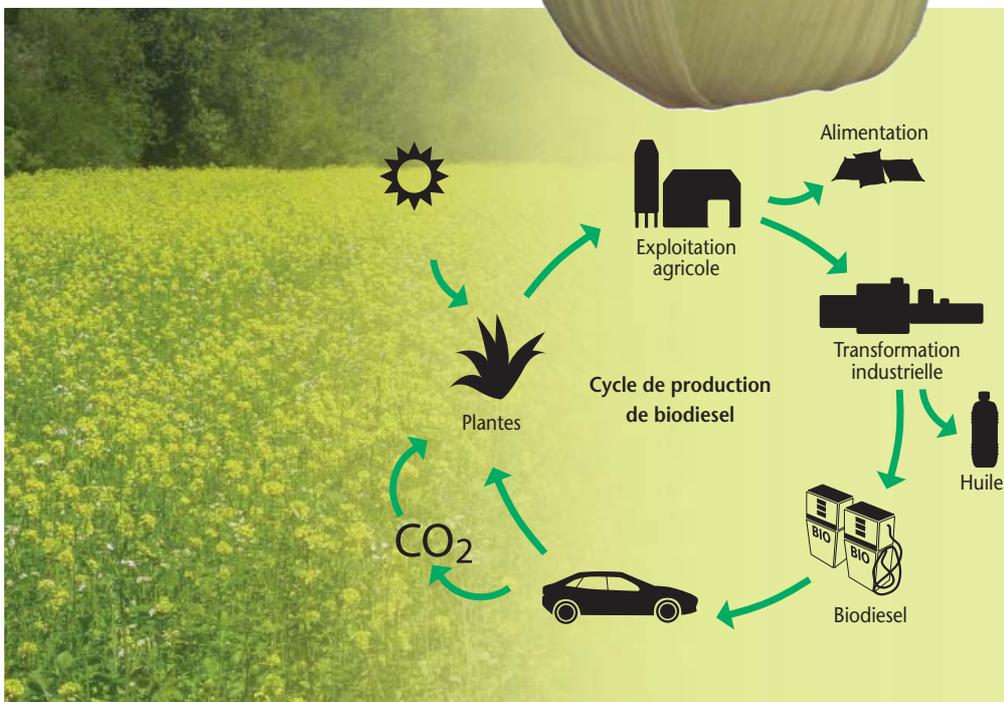
La biomasse ne peut pas directement fournir de l'énergie par sa simple combustion. Via des processus comme la gazéification et la fermentation, le matériau biologique peut être transformé en biogaz. La biomasse "sèche", comme le bois, peut par exemple être chauffée dans des conditions anaérobies (c'est-à-dire sans que de l'oxygène puisse atteindre le bois). Il se forme alors un carburant gazeux, qui par combustion, peut être à son tour transformé en électricité et en chaleur. D'autre part, via ce processus, vous obtenez la création de substances oléagineuses. Cette huile est peut-être la plus précieuse comme source de certains produits chimiques fins, et les résidus peuvent à nouveau être brûlés.

La biomasse "humide", comme toutes sortes de déchets organiques, le limon extrait de l'épuration des eaux usées ou le fumier, peut être transformée en biogaz (un mélange de CO₂ et CH₄ ou méthane) par des bactéries dans un environnement sans oxygène (anaérobie) et de faibles températures. Après épuration, le biogaz présente pratiquement la même qualité que le gaz naturel.

Et mon réservoir d'essence ?

Des substituts du diesel et de l'essence peuvent également être créés au départ de sources biologiques. Nous parlons dans ce cas de biocarburants. La source la plus connue est l'huile de colza, mais d'autres huiles végétales, et même l'huile utilisée pour la friture peuvent parfaitement être utilisées comme matériau de base pour la synthèse de ce que l'on appelle le biodiesel. D'un point de vue chimique, une huile se compose d'une molécule de glycérol, à laquelle sont associés de longs acides gras, via une liaison ester. Lorsque nous cassons la liaison ester, et appliquons un groupe méthyle à la place du glycérol (comme vous pouvez le voir sur la figure), nous obtenons une molécule que nous pouvons utiliser dans nos moteurs diesel.

Le biodiesel semble donc être la méthode par excellence pour pouvoir continuer à faire rouler nos voitures, si le pétrole, pour une raison ou pour une autre, venait à se faire rare à l'avenir. Quelques chiffres en rapport avec le biodiesel permettent de discerner clairement où se situe le problème. L'Union européenne a posé comme principe qu'en 2010, 5,75 % de tout le diesel qui est consommé en Europe devra être du biodiesel. En tenant compte de la capacité de production actuelle d'un hectare de terres cultivables moyennes au sein de l'UE, pour le colza naturellement, nous devrions sur notre continent planter





entièrement quelque 9,5 millions d'hectares de colza... soit 9,77 % de toutes les terres cultivables dans l'UE. C'est faisable. L'Agence européenne pour l'environnement a calculé que d'ici à 2020, on peut produire suffisamment de biomasse pour répondre à 20 % de nos besoins en Europe – sans porter préjudice aux bonnes pratiques de l'agriculture, une production durable de biomasse, et sans une réduction notable de la production alimentaire locale. En outre, nous partons du principe que 15 % de la biomasse est importée en provenance de pays hors des frontières européennes. Il existe encore des régions présentant un grand potentiel de biomasse susceptible d'être produite de façon durable.

Toutefois, le problème peut encore être plus complexe... en 2006, la Belgique comptait 9600 ha de terres cultivables où poussait du colza. Cela représentait en tout et pour tout 3,6 % de la superficie dont nous avons besoin pour produire suffisamment de biodiesel pour atteindre les 5,75 % en 2010. Cette superficie correspondait déjà à 32 % de la surface totale de la Belgique adaptée pour l'agriculture. On peut alors se demander où nous allons cultiver toutes ces plantes. Et aussi, où nous allons cultiver les plantes nécessaires pour produire notre alimentation.

En outre, les scientifiques des fameuses universités américaines, la Cornell University et la University of California- Berkely, estiment que pour fabriquer du biodiesel, il faut investir plus d'énergie dans le pro-

cessus de production que celle que l'on retire finalement – via la récolte, le traitement de la masse de plantes, la transformation de l'huile en diesel, ...

N'existe-t-il alors aucun autre substitut ? Si, bien sûr. Via la fermentation, la biomasse de céréales ou de la canne à sucre dégage du bioéthanol. Le Brésil produit par exemple déjà depuis des années du bioéthanol comme carburant pour leur parc de voitures. L'éthanol est facilement mélangé à l'essence. Des chercheurs en agriculture essaient entre-temps de faire fermenter d'autres plantes comme la canne à sucre, l'ananas ou le manioc pour les transformer en alcool. Une des conditions nécessaires en ce sens est que les variétés sélectionnées et cultivées contiennent beaucoup de sucre ou d'amidon.

Seulement... les mêmes problèmes que pour le biodiesel s'appliquent pour l'éthanol : les frais énergétiques sont supérieurs à ce que le carburant fournit finalement. En outre, de cette façon, nous utilisons des aliments pour faire rouler nos voitures. Par conséquent, la véritable nourriture devient plus chère. Pour prendre un exemple – la demande de maïs pour la production de bioéthanol était tellement importante que le prix des aliments à base de maïs a également augmenté de façon spectaculaire. Le prix des tortillas, sans aucun doute un aliment de base au Mexique, a augmenté si rapidement qu'au début de 2007, des troubles ont surgi dans le pays. Ce dilemme assez

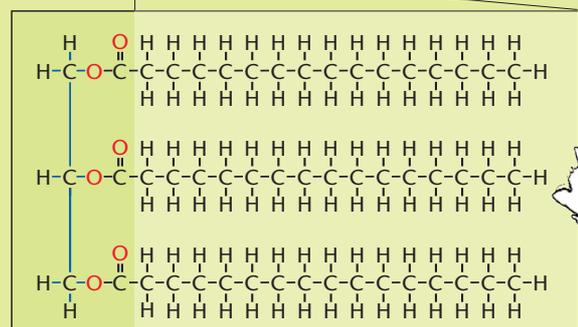
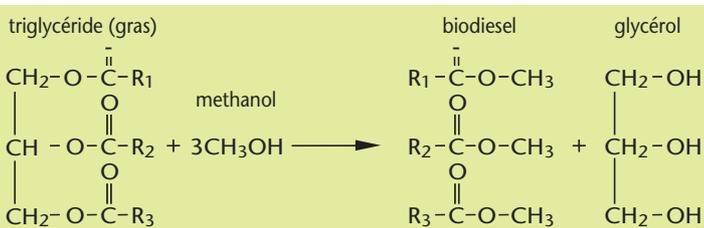
pervers – manger ou se déplacer – est encore davantage à l'ordre du jour dans le cas de la production de bioénergie.

Enfin, la production des premiers carburants présentait aussi, assez ironiquement, un certain nombre de conséquences négatives pour l'environnement. Nous avons déjà indiqué plus haut que la biomasse contient assez bien d'azote et de soufre, deux éléments contribuant à la formation de smog et de pluies acides. D'autre part, le marché incite les agriculteurs à cultiver du maïs, des céréales et des cannes à sucres à grande échelle pour la production de bioéthanol. L'installation de grands champs de monocultures qui en découle est une menace directe pour la biodiversité sur terre. Non seulement les cultures plus petites vont disparaître, mais de plus en plus, de précieuses zones naturelles vont y passer, car les terres vont être réquisitionnées pour les cultures de biocarburant.

Et maintenant ?

Les biocarburants ne sont-ils donc absolument pas une option valide ? Si, bien sûr. C'est pourquoi des recherches importantes sont mises en œuvre pour créer des biocarburants de seconde génération. Ceux-ci fournissent bien de l'énergie nette, et charment moins l'environnement que d'autres carburants. Parmi ces nouveaux carburants, on peut citer le diméthylfurane (obtenu via la fermentation de cellulose et d'amidon), le biométhanol (à partir du bois) et le diesel ligneux (à base d'huile extraite de pastilles de bois). Le biogaz également présente un certain potentiel. De plus en plus, règne également l'idée que certaines terres, ne faisant pas directement partie de la surface cultivable, peuvent servir pour la culture de biomasse. Les sols très pollués, par exemple – pourquoi pas – les bandes vertes le long des routes et autoroutes. La Belgique devra du reste importer de la bioénergie – tout comme nous importons aujourd'hui du pétrole et du gaz. Sous ces conditions, la bioénergie est également une carte à jouer pour la Belgique.

En résumé – la biomasse présente un très grand potentiel. La recherche de nouveaux processus améliorés pour une production d'énergie à l'aide de la biomasse est bien en cours, et les résultats sont prometteurs.



Synthèse du biodiesel à partir de graisses



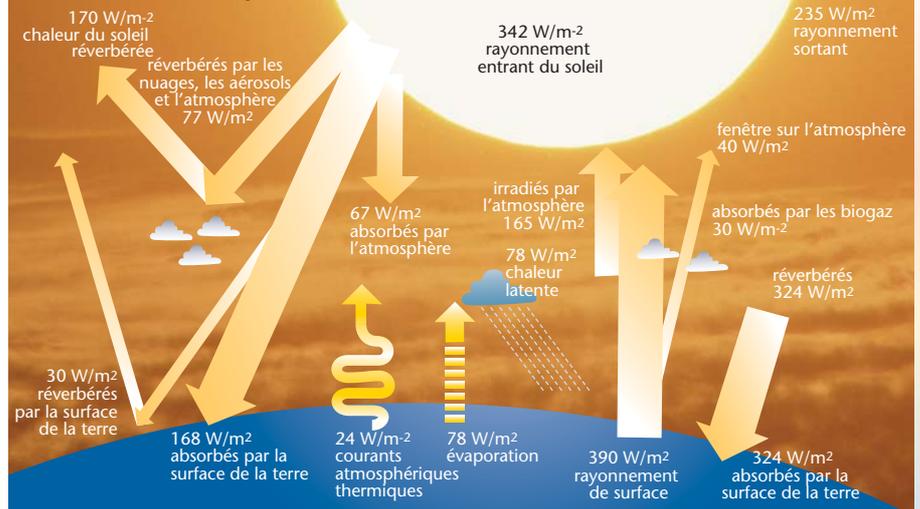
Les cellules solaires

Pratiquement toute l'énergie sur terre provient du soleil. Et ce n'est pas tout : voir l'encadré et plus loin. Le soleil est en fait comparable à un réacteur de fusion nucléaire d'un diamètre de 1,3 million de kilomètres et une masse de $1,989 \times 10^{30}$ kg, qui transforme par seconde 600 millions de tonnes d'hydrogène en 596 millions de tonnes d'hélium. La différence de masse est émise... comme énergie. Il s'agit là de beaucoup d'énergie : selon la fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$, ce type de réactions transforme de la masse en énergie, 1 kilogramme de masse correspond à 9×10^{16} joules. De toute cette énergie, seule une fraction parvient jusqu'à la surface de la terre : nous recevons sur notre boule bleue (d'un diamètre de 12756 km) en moyenne 342 joules par m^2 et par seconde. Si le soleil se trouve exactement au-dessus de vous, vous recevez alors $1366 \text{ J} / m^2 \text{ s}$. Les physiciens amateurs parmi les lecteurs auront déjà calculé depuis longtemps la quantité d'énergie émise par le soleil et la fraction de cette énergie qui nous parvient sur la terre. Pour rappel : $1 \text{ J} / m^2 \text{ s} = 1 \text{ W} / m^2$ parce que $1 \text{ J} \cdot s^{-1} = 1 \text{ W}(\text{att})$.

Vous pouvez alors à présent vous demander pourquoi notre planète n'a pas été transformée depuis longtemps en un four à chaleur pulsée, puisque autant d'énergie par seconde vient s'échouer sur la terre. Vous pouvez en trouver la raison sur la figure : une grande partie de l'énergie solaire qui nous parvient est réfléchiée par les nuages, une partie assure l'évaporation des eaux et la formation de toutes sortes de précipitations, une autre partie encore est réabsorbée par la surface de la terre... qui dégagera elle-même de l'énergie. Tout pris l'un dans l'autre, la terre ne gagne ou ne perd presque pas d'énergie nette.

Et qu'en est-il des organismes sur terre ? Ne consomment-ils pas une grande partie de l'énergie qui atteint notre planète ? Eh bien, rien n'est moins vrai. Toutes les

L'équilibre énergétique à la surface de la terre. Faites le calcul vous-même, nous sommes en équilibre.



plantes fixent ensemble, grâce à l'énergie du soleil, pratiquement 2×10^{11} tonnes de carbone par an, et elles utilisent pour cela 3×10^{21} J, soit environ un millième de la quantité d'énergie solaire qui atteint notre planète. Les hommes consomment chaque année un dixième (3×10^{20} J) de ce qui est consigné dans notre biosphère via la photosynthèse.

Un domaine où il y a beaucoup à faire ces dernières années est celui du rôle des différents gaz dans l'atmosphère, et surtout le dioxyde de carbone. Environ un tiers du rayonnement ($107 \text{ W} / m^2$) que le soleil envoie en direction de la terre est réfléchi dans l'espace. Une partie ($67 \text{ W} / m^2$) est absorbée par l'atmosphère (nuages, particules dans les couches supérieures de l'atmosphère). La moitié restante des rayons ($168 \text{ W} / m^2$) parvient effectivement jusqu'à la surface de la terre (y compris les océans). Une partie de cette énergie est à l'origine de toutes sortes de phénomènes climatiques : vent ($24 \text{ W} / m^2$) et précipitations ($78 \text{ W} / m^2$). Il s'agit de l'énergie qui veille à ce que le cycle de l'eau se poursuive sur la terre. La surface de la terre réfléchit également une partie de ce rayonnement, et émet elle-même en retour un certain rayonnement. Ce n'est pas étonnant : la physique nous apprend que tous les objets présentant une certaine température émettent une quantité d'énergie (au total, $390 \text{ W} / m^2$). Quelque $235 \text{ W} / m^2$

entre effectivement à nouveau dans l'espace comme rayonnement infrarouge à ondes longues. L'atmosphère en réfléchit une partie, et libère également de la chaleur absorbée. Et ensuite, il se passe encore quelque chose. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote absorbent les rayons infrarouges et l'atmosphère sur terre se réchauffe. Par ailleurs, nous connaissons déjà ces gaz sous le nom de 'gaz à effet de serre'. Ils enveloppent la terre comme une énorme couverture qui, il est vrai, laisse passer les rayons du soleil, mais empêche en même temps le rayonnement de chaleur de sortir. Heureusement qu'il y a des gaz à effet de serre, car sans, la terre serait environ à 20°C en dessous de zéro. En fin de compte, $324 \text{ W} / m^2$ d'énergie atteignent la surface de la terre en provenance de l'atmosphère. Aujourd'hui, l'ensemble du système est en principe en équilibre : la terre, l'espace et l'atmosphère reçoivent autant d'énergie qu'ils n'en libèrent. Et en libèrent autant qu'ils n'en reçoivent. Mais serait-il si mauvais de conserver encore un centième d'un pour cent de la masse d'énergie qui inonde notre terre ?



Prototype de GSM avec cellules solaires

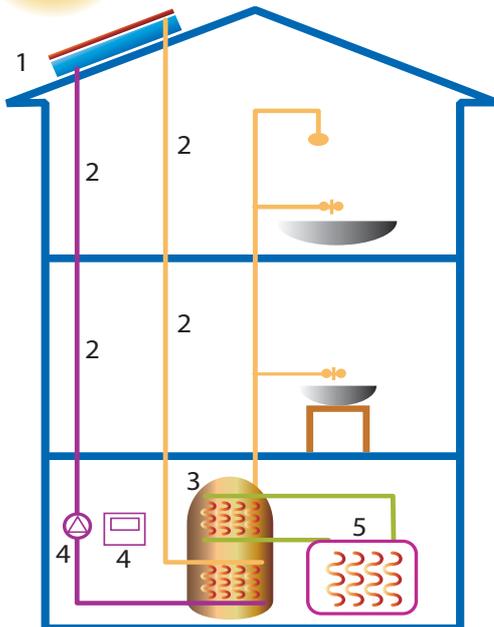
Station spatiale internationale

L'air chaud et l'eau chaude

Pour chiper une infime partie de ces rayons du soleil incidents, il suffit de construire de façon intelligente, de manière à pouvoir profiter au maximum de la lumière du soleil qui entre dans nos maisons. L'énergie solaire passive la chauffe alors. Il est indispensable de placer quelques fenêtres de façon stratégique et d'installer une bonne isolation des murs, des sols et du toit. Avec quelques grandes baies vitrées orientées au sud de votre habitation (ou aucune fenêtre du côté nord, jamais exposé au soleil), vous pouvez déjà faire entrer chez vous pas mal de chaleur et de lumière. L'isolation veille à ce que la chaleur reste à l'intérieur. Pas besoin d'une installation spéciale. S'il fait trop chaud en été, vous pouvez placer quelques feuillus devant les fenêtres au sud. En été, les feuilles

Schéma d'un chauffe-eau solaire.

- 1 : collecteur solaire
- 2 : circulation de l'eau, eau chaude (jaune) du collecteur vers le chauffe-eau et eau froide (gris) du chauffe-eau vers le collecteur
- 3 : chauffe-eau
- 4 : pompe à eau
- 5 : chaudière classique



veilleront à vous protéger d'une partie des rayons du soleil, mais en hiver, vous pourrez profiter au maximum de toutes les heures de soleil, même s'il n'y en a parfois que très peu. Nous conseillons du reste des pommiers. C'est en plus très bon... Si vous ne pouvez pas planter d'arbres, il est également possible d'installer des marquises spéciales, sous lesquelles peut briller le soleil bas de l'hiver, mais qui vous protègent du soleil d'été, beaucoup plus haut dans le ciel.

L'installation d'un chauffe-eau solaire est quant à elle un peu plus compliquée. Cependant, les avantages sont évidents : avec une installation de ce type, vous pouvez en effet épargner environ la moitié de vos frais de chauffage pour l'eau. Grâce à la chaleur du soleil. Un collecteur solaire est placé sur votre toit : un bac muni de canalisations noires, recouvert d'une plaque de verre plate. Le liquide qui circule dans les canalisations (par exemple de l'eau, contenant un antigel) est chauffé par la lumière du soleil. En présence d'un soleil de plomb, la température de ce liquide peut grimper jusqu'à 90°C. Le liquide chaud circule alors vers le chauffe-eau à proprement parler, et y chauffe votre eau froide. En été, ce système doit être suffisant pour couvrir tous vos besoins en eau chaude. En hiver, vous devrez encore partiellement chauffer l'eau de manière classique.

Attrapez le soleil dans une petite boîte

Mais nous voulons plus. De préférence, attraper l'énergie de la lumière du soleil le plus directement possible. Finalement, les plantes peuvent le faire via leur photosynthèse. Pourquoi ne pourrions-nous pas dès lors concevoir un instrument semblable ? En fait, il existe déjà, mais avec toutes les imperfections qu'il présente encore : la cellule solaire.

Une cellule solaire est par essence un petit appareil électrique qui transforme la lumière du soleil en énergie électrique uti-

lisable. Ce processus s'appelle la conversion photovoltaïque. Nous en distinguons deux types : la cellule photovoltaïque, qui ne fonctionne qu'avec des matières solides, et la cellule photoélectrochimique, qui utilise à la fois des matières solides et liquides. Ce sont surtout les cellules photovoltaïques que nous retrouvons dans les panneaux solaires.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est fondé sur des connaissances avancées de la physique et de la chimie. Ce n'est donc pas à la portée de tout le monde. Nous allons aborder étape par étape les éléments de connaissance nécessaires...

Premier élément de connaissance. Une cellule solaire se compose d'un semi-conducteur. Auparavant, on connaissait pour l'électricité les conducteurs (essentiellement en métal, comme le fil de cuivre) et les non-conducteurs (comme le sable et la plupart des substances organiques). Les conducteurs laissent passer le courant électrique, car ils ont la possibilité d'envoyer des électrons au-dessus et à travers eux-mêmes. Et un courant électrique, qu'est-ce d'autre que des électrons en mouvement ? Les non-conducteurs n'ont pas d'électrons libres, et ne conduisent donc pas le courant. Ou alors ? Vers le milieu du 20ème siècle, on a découvert que certains non-conducteurs, comme le silicium pur, pouvaient cependant conduire de l'électricité si on ajoutait à ces substances pures certains 'contaminants' comme du phosphore et du bore. Ces contaminants assurent alors l'apparition de porteurs de charges libres. Ceux-ci peuvent être positifs ou négatifs. Si ces porteurs de charges libres, par ex. pour le silicium, sont positifs, on parle de p-silicium ; s'ils sont négatifs, on parle de n-silicium.

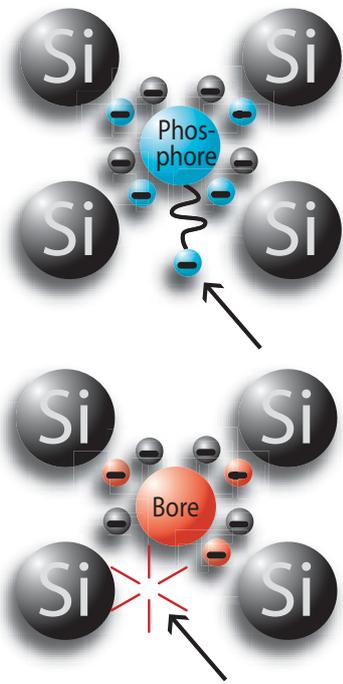
À présent, comment faut-il se représenter ce porteur de charges libre ? Revenons aux électrons. Les atomes d'un semi-conducteur contiennent des électrons, comme tous les autres atomes. Les électrons se trouvant le plus à l'extérieur de l'atome remplissent dès lors des fonctions

La lumière est une forme d'énergie, ce que nous exprimons en disant qu'une particule de lumière (photon), contient une énergie $E = h\nu$. Dans cet exemple, h correspond à la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s), et ν (la lettre grecque nu) à la fréquence du photon. Ce dernier paramètre est lié à la longueur d'onde λ et donc, la couleur de la lumière, via l'expression $c = \lambda\nu$. c correspond ici bien sûr à la vitesse de la lumière, 299 792 458 m / s (Voir aussi MENS n° 23, 'Voir').

Toute l'énergie ? Non !

Afflux d'énergie sur terre	J/an	%
Énergie solaire	$3.93 \cdot 10^{24}$	99.96
Énergie géothermique	$6.72 \cdot 10^{20}$	0.017
Énergie marémotrice	$5.20 \cdot 10^{19}$	0.001
TOTAL	$3.93 \cdot 10^{24}$	100.00

Ici, sur terre, la majeure partie de l'énergie provient du soleil, c'est ce que l'on peut lire dans ce tableau. Une petite partie de l'énergie présente sur terre provient toutefois de l'intérieur de la terre (appelée énergie géothermique), et une fraction encore plus petite, nous la devons à la force d'attraction entre la terre et la lune.



Structure électronique d'un atome semi-conducteur e et p

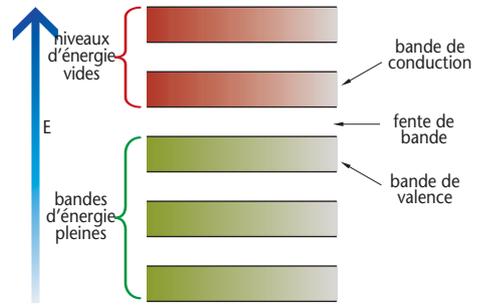
particulières : c'est ce que l'on appelle les électrons valence, qui jouent notamment un rôle dans l'établissement et la rupture des liaisons chimiques, mais aussi dans la transmission du courant électrique. Ce sont en effet ces électrons valence qui vont se déplacer comme le courant. Pour poursuivre avec notre exemple du silicium – cet élément a 4 électrons valence. Si l'on ajoute du phosphore au silicium, nous introduisons un atome ayant 5 électrons valence. Puisque le Si s'entourera volontiers de 8 électrons, il y en a donc un en trop et par conséquent, on obtient du n-silicium, avec un électron conducteur en trop. Si l'on y ajoute du bore, alors il manque un électron, puisque le bore n'en a que 3. Par conséquent, il en résulte un vide. Et un vide, en l'absence d'un électron chargé négativement, est de ce fait comblé positivement. On obtient ainsi du p-silicium. Avec un excédent de trous positifs. Si les électrons valence d'une plaque de silicium de ce type commencent à se déplacer, ils sauteront de trou en trou.

Deuxième élément de connaissance – que se passe-t-il lorsque de la lumière atteint un semi-conducteur ? Ici encore, il nous faut revenir sur la structure des atomes. Dans les atomes, les électrons se situent de façon plutôt ordonnée. Différentes couches sont disponibles, où à chaque fois, un nombre déterminé d'électrons peut prendre place. Plus ils sont éloignés du noyau, et plus les électrons contiennent de l'énergie. Au fil des années, ces couches ont reçu différents noms, à mesure que s'amélioraient les connaissances relatives à la structure de l'atome. Le modèle de l'atome d'hydrogène de Niels Bohr parlait de couches, la mécanique quantique utilise le terme orbi-

te. Dans le contexte des conducteurs et semi-conducteurs, on parle aussi parfois de différentes bandes d'énergie. La place des électrons valence est la bande valence, la plus haute bande avec des électrons d'un atome présentant un stock d'énergie minimum. Voir figure. Si un électron de la bande de valence acquiert de l'énergie supplémentaire, par exemple en présence d'une lumière incidente sur l'atome, alors cet électron peut sauter vers une couche supérieure : la bande de conduction. Toutes les formes de lumières ne sont pas susceptibles de déclencher ce saut. Le contenu énergétique d'une particule de lumière doit au moins être aussi gros que la différence de contenu énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction. Nous exprimons cette différence en termes de distance de bande (en anglais, band gap). Plus la distance de bande est petite, moins il faut d'énergie pour faire sauter les électrons du semi-conducteur.

En outre – contrairement à la plupart des conducteurs, la capacité de charge électrique d'un semi-conducteur augmente lorsque la température augmente. La chaleur donne suffisamment d'énergie aux électrons pour bouger, ce qui entraîne une conduction électrique. La chaleur du soleil encourage ces sauts des électrons.

Revenons à notre cellule solaire. Nous nous trouvons aussi bien en présence de semi-conducteurs de type n que de type p. S'il y a une lumière du soleil incidente sur ces semi-conducteurs, leurs porteurs de charges libres commencent à bouger. Il est intéressant à présent de connaître le plan de séparation du semi-conducteur p et n. Examinez un instant la figure ci-après. À droite, vous voyez les bandes d'électrons d'un semi-conducteur p, à gauche, celles d'un semi-conducteur n. Si un électron de la bande de valence (la ligne verte) saute dans la bande de conduction (ligne

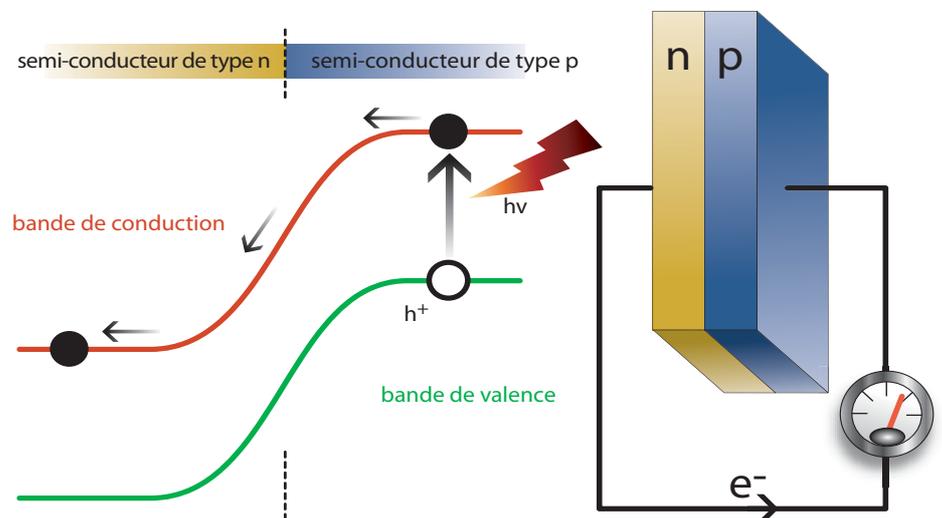


Structure des électrons d'un atome semi-conducteur

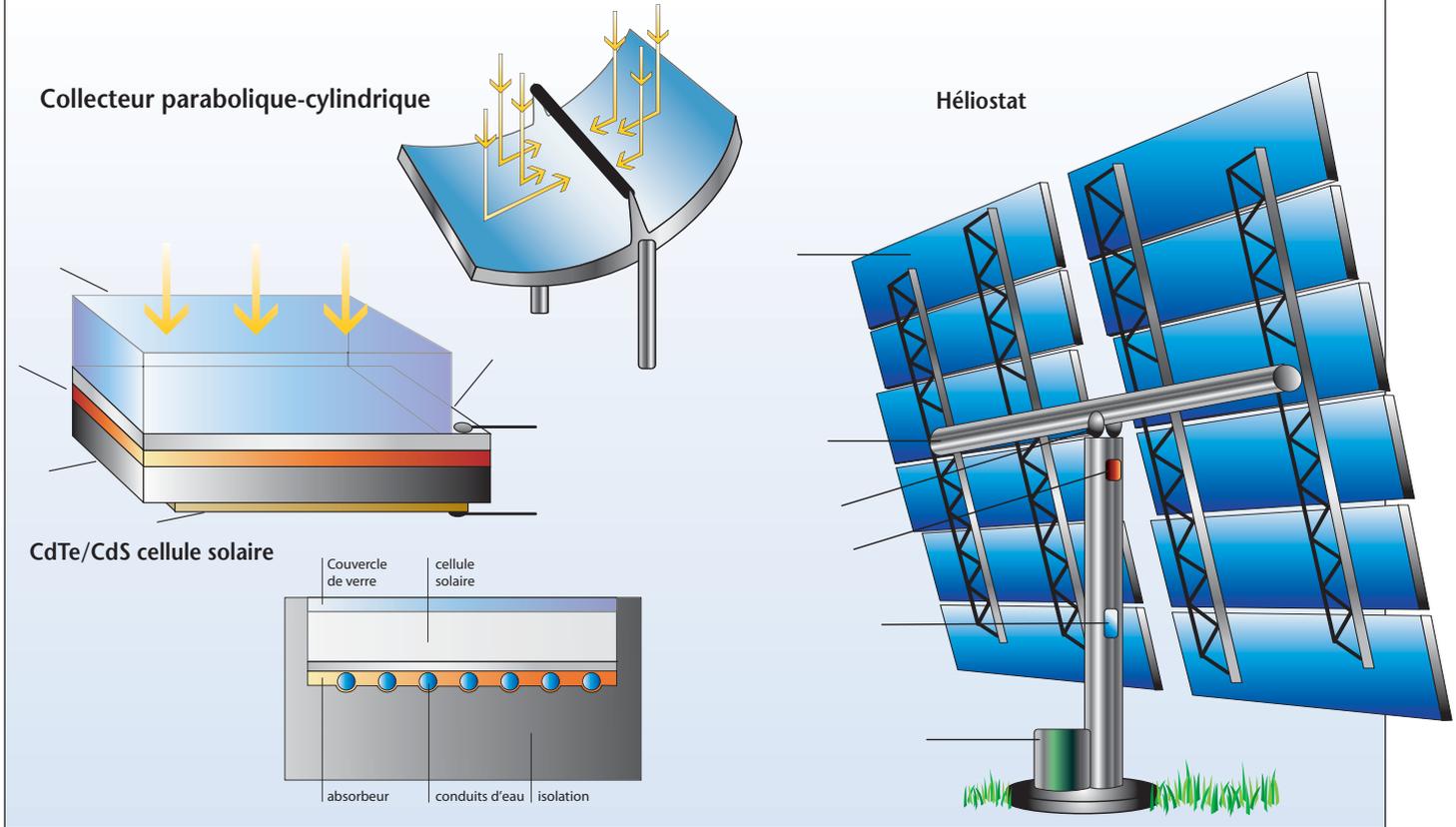
rouge), il en résulte un trou dans la bande de valence (h^+) et l'électron (e^-) s'installe dans la bande de conduction. En règle générale, ce type d'électron retombe rapidement dans la bande de valence, et libère un peu de chaleur. Mais à proximité du plan de séparation, il est possible que cet électron continue de bouger, et donc, passe de sa propre bande de conduction dans le type p à la bande de conduction des atomes voisins dans le type n, et là, retombe dans la bande de valence. Dans la partie de type p, les niveaux d'énergie des bandes de conduction et de valence sont plus élevés que dans le type n. Un électron qui est revenu dans la bande de valence d'un atome d'un semi-conducteur de type n, ne se situe donc plus dans sa position initiale. La conséquence est que les électrons dans une cellule solaire vont se déplacer de la partie p vers la partie n et donc qu'il y aura plus de trous dans la partie p. Si nous relient à présent les deux côtés d'un fil électrique, nous obtenons un circuit électrique. La lumière a été convertie en électricité.

Où trouve-t-on des cellules solaires ?

Malgré toute la physique et la chimie compliquées, cela semble être une technologie prometteuse. Dans le climat belge, des panneaux solaires peuvent par



Fonctionnement d'une cellule solaire. Vous trouverez plus d'explications dans le texte.



exemple produire en moyenne par année 100 kWh par m² de courant "vert". C'est déjà suffisant à présent pour fournir 30 % de la consommation annuelle belge, pour autant que tous les toits et les façades bien orientés soient équipés de panneaux solaires.

Pourtant, on ne voit pas encore apparaître beaucoup de ces panneaux. Comment est-ce possible ? En fait, le plus gros inconvénient des panneaux solaires est qu'ils sont encore très chers à fabriquer. Le prix de revient est surtout lié au coût pour préparer le silicium sous forme cristalline, ce qui signifie que les atomes se trouvent bien rangés l'un à côté de l'autre suivant un modèle géométrique régulier. On travaille activement à des alternatives meilleur marché, par ex. au départ de silicium amorphe. La difficulté ici réside en ce que le silicium doit être déposé en très fines couches sur un support. Et ça, ce n'est pas encore pour demain.

On essaie également d'améliorer l'efficacité des cellules solaires dans d'autres domaines, par exemple, en superposant des cellules solaires différentes ou en saisissant la lumière de manière déterminée : des héliostats réfléchissent la lumière du soleil perçue vers la cellule solaire ; via des collecteurs paraboliques, la lumière du soleil est concentrée dans le foyer du collecteur, où se trouve un canal d'eau, qui est ainsi chauffé. Des matériaux alternatifs sont également testés (comme les cellules solaires au tellure de cadmium / sulfure de cadmium).

Les nouveaux développements sont des combinaisons de cellules photovoltaïques et de collecteurs de chaleur. Dans ce cas,

les cellules solaires sont encapsulées de trois côtés dans un matériau isolant. Sous la couche contenant les cellules solaires, circulent des conduits d'eau qui sont chauffés par la chaleur du soleil. En même temps, ils refroidissent les cellules solaires, ce qui profite à leur efficacité. En voici un exemple dans la figure ci-dessous.

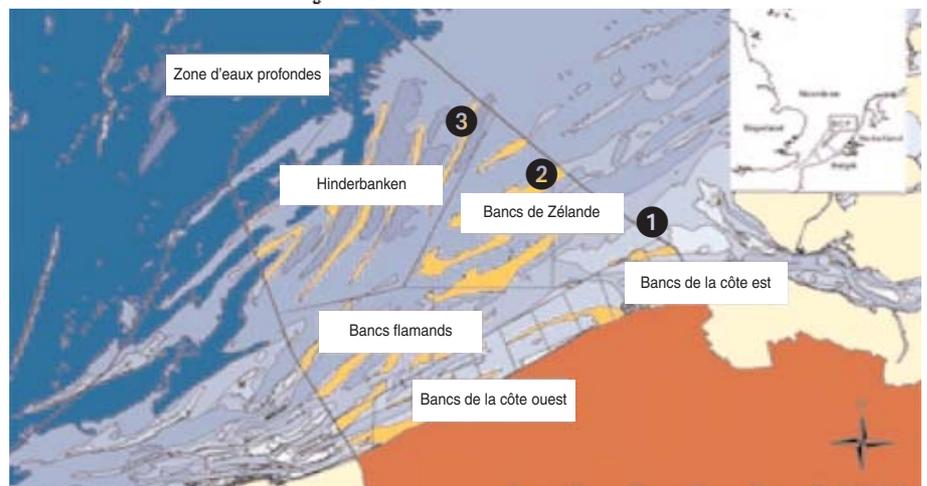
En résumé – les cellules solaires comportent de nombreuses possibilités, même dans un pays apparemment peu ensoleillé comme le nôtre. Les grands défis pour l'avenir consistent à réduire le prix de revient et à augmenter l'efficacité des cellules.



La force du vent

Le vent est une autre source d'énergie vieille comme Mathusalem. Il s'agit d'air en mouvement. Auparavant, il était utilisé pour fournir un travail mécanique, comme moulin à céréales. Les Pays-Bas en sont les témoins et de beaux moulins à vent sont aussi conservés ailleurs en Europe. Aujourd'hui, le vent est surtout utilisé pour actionner une turbine éolienne. Celle-ci transforme alors le travail mécanique du vent en électricité.

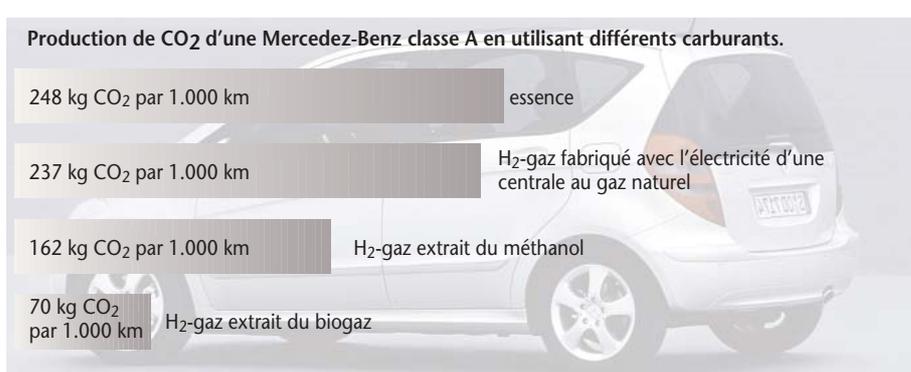
Et ce n'est pas rien. Une éolienne standard de 50 m de haut, équipée de 2 ou 3 pales d'une longueur de 40 m chacune et une hauteur de mât de 50 m, peut produire, dans des conditions normales (force du vent 6) 500 à 750 kW. De plus grandes éoliennes produisent jusqu'à 3 MW, et les modèles les plus récents produisent 5 à 6 MW. Les principaux développements concernent l'augmentation de la surface des pales.



1 Banc Thornton, 2 Banc Bligh et 3 la Vlakte van de Raan

Et on utilise déjà le vent en Europe : actuellement, des éoliennes sont installées pour produire 50 GW dans l'UE. Ce chiffre correspond à 3 % de la consommation d'énergie de l'UE, et de cette façon, l'Europe réduit ses émissions de CO₂ de 80 millions de tonnes. D'autre part, les différences régionales sont énormes : le Danemark puise 20 % de son énergie dans l'énergie éolienne, l'Espagne 8 % et l'Allemagne 7 %. La Belgique prévoit la construction de parcs à éoliennes sur un certain nombre de bancs de sable dans la Mer du Nord (comme le banc de Thornton, le banc sans Nom et le banc Bligh). Aujourd'hui, c'est le projet sur le banc de Thornton qui est le plus développé.

Il n'est en rien étonnant qu'on puisse capter autant de vent. L'énergie éolienne constitue peut-être la source d'énergie alternative offrant la meilleure technique et la moins chère du moment. Il n'y a non plus aucun danger imperceptible lié à cette technologie : pas d'émission de CO₂, SO₂ ou NO₂, rien ne peut s'écouler vers les eaux souterraines, aucun conduit souterrain ne risque d'exploser. Les éoliennes ne produisent aucune masse de déchets contrairement aux centrales nucléaires et aux centrales à charbon. Pourtant, tout n'est pas parfait non plus pour l'énergie éolienne. Il y a un certain nombre d'années, un projet de parc à éoliennes sur la Plaine de De Raan, un banc de sable à hauteur de Knokke-Heist, a été torpillé de plaintes émanant des habitants de Knokke et d'associations environnementales. Les habitants argumentaient que la vue sur la mer depuis Knokke serait gâchée. Selon les associations environnementales, l'emplacement était une zone de repos pour les oiseaux migrateurs lorsqu'ils font route vers le sud. En outre, il subsiste l'insécurité du vent comme source d'énergie. Il ne souffle pas



toujours avec la même force, les variations sont souvent énormes et l'entreposage d'électricité lors des périodes de surplus pour pouvoir répondre à la demande lorsqu'elle dépasse l'offre, est une prouesse techniquement difficile. On travaille alors avec des générateurs turbojet, fonctionnant avec du carburant fossile et en mesure de compenser une diminution soudaine dans l'alimentation de vapeur des turbines éoliennes.

Enfin, l'énergie éolienne est encore chère en ce moment par rapport aux sources d'électricité classiques. Les frais opérationnels de l'électricité en provenance de l'énergie éolienne sont encore momentanément de deux à trois fois plus élevés que ceux du courant émanant de sources classiques. Le consommateur ne remarque toutefois encore rien, car les autorités subsidient fortement l'installation et l'exploitation de parcs à éoliennes. C'est un choix que font les autorités, un choix que nous payons donc en tant que société. Un certain nombre d'éléments soutiennent ce choix : finalement, la Belgique est obligée en vertu des accords de Kyoto de réduire ses émissions de CO₂, sous peine d'une amende élevée. En travaillant de manière préventive, les autorités espèrent éviter l'amende. En outre, en guise de boutade, on peut dire que la plus grosse différence

entre la production de courant avec des carburants fossiles et celle avec des sources alternatives repose sur le fait que les installations pour la première existent déjà, tandis que pour la deuxième pas encore. L'ajout de sommes de départ pour une tâche industrielle naissante, ne cadre donc pas vraiment avec les principes d'une économie de marché libre, mais offre à l'industrie et aux technologies novatrices une chance de survie.

En résumé – les hautes éoliennes captent beaucoup de vent, et beaucoup de vent signifie beaucoup de courant. La réalisation technique est déjà bien en cours, et les autorités démontrent un grand intérêt pour l'énergie éolienne.

Du gaz oxhydrique à la base pour l'économie : l'hydrogène

Nous en avons déjà beaucoup parlé dans le chapitre relatif à la fusion nucléaire, mais s'il existe aujourd'hui un élément vraiment présent en abondance sur cette planète, c'est bien l'hydrogène – le plus simple de tous les atomes, dans sa forme la plus courante, soit un seul proton autour duquel tourne un seul électron. Néanmoins, l'élé-



ment libre n'est pas présent sous cette forme. Mais bien comme proton (H⁺) pendant les réactions acide-base, ainsi que comme H₂, hydrogène gazeux.

Ce gaz peut également être brûlé. Il réagit alors pour donner de l'O₂ et du H₂O, exactement, simplement de l'eau. Durant cette combustion, de l'énergie est également libérée. Une expérience de chimie typique dans l'enseignement secondaire explique cette production et démontre la présence de gaz oxyhydrique, avec ou sans électrolyse de l'eau. Le gaz oxyhydrique est de l'hydrogène gazeux (mélangé à de l'air). Ce gaz d'hydrogène réagit de manière très explosive avec l'oxygène (en libérant une bonne dose d'énergie), comme le démontre également l'expérience. Alors, ne pouvons-nous pas utiliser cette énergie d'une manière ou d'une autre ?

La réponse est naturellement oui, et ce n'est pas étonnant. Un kilogramme d'hydrogène renferme énormément d'énergie (autant que 3,5 litres de pétrole). En outre, l'hydrogène est une manière idéale pour compenser les fluctuations dans la production d'électricité. Dans une économie où nous voulons utiliser de plus en plus de sources d'énergie qui ne peuvent pas garantir une production d'électricité stable (pensez au vent, au rayonnement du soleil), il est particulièrement important d'épargner en période d'excédent pour pouvoir faire face à la demande en période de pénurie. Même si ces deux périodes ne diffèrent que d'une seule heure. L'hydrogène stocké peut alors être utilisé par la suite pour créer à nouveau de l'électricité, ou directement comme source d'énergie pour bon nombre de processus, comme la cuisine, le chauffage ou les carburants pour voitures.



Les bus de De Lijn ne roulent pas uniquement à l'essence ou au diesel, un bus en Flandre circule également avec de l'hydrogène véritable.

Comment prépare-t-on de l'hydrogène gazeux (et comment puis-je l'utiliser chez moi) ?

La principale source d'hydrogène gazeux est momentanément encore la décomposition chimique et la transformation des carburants fossiles. Cela signifie en fait que l'hydrogène ne contribue pas vraiment en ce moment à une réduction de notre consommation de pétrole et de gaz naturel. Mais nous progressons toutefois en ce qui concerne les émissions de CO₂. Les processus de production d'hydrogène produisent moins de CO₂ sur la base d'une certaine quantité de carburants fossiles que lorsque le pétrole est directement brûlé. Comparez un instant sur la figure les différents processus. Il existe même des processus de production où les hydrocarbures sont directement séparés en carbone pur et hydrogène gazeux. Les émissions de CO₂ sont alors minimales.

Cependant, nous voulons à terme supprimer ces émissions de CO₂, et nous voulons une économie qui soit moins dépendante des carburants fossiles. Ces procédés ont entre-temps été découverts,

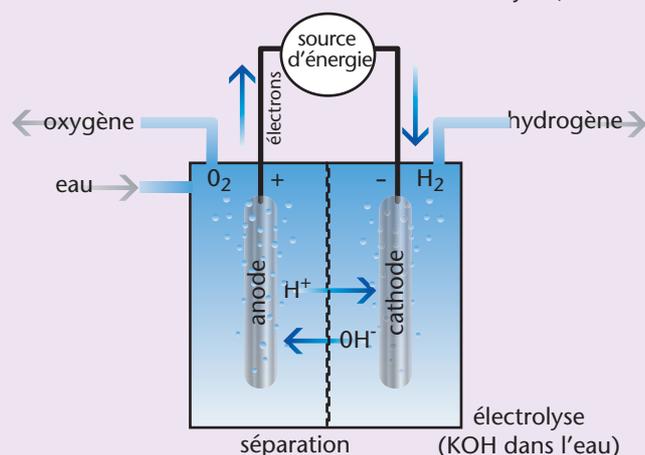
mais ils ne fonctionnent pas encore tous de façon optimale.

Pour commencer, nous ne devons pas utiliser de gaz naturel pour la production d'hydrogène gazeux. Le biogaz, à savoir, le méthane qui se forme lors de la gazéification et de la décomposition anaérobie de la biomasse (voir également sous ce petit titre), s'en charge tout aussi bien. Et ensuite, nous ne devons consommer aucun méthane fossile. Nous pouvons même omettre la production de méthane et mettre directement les bactéries au travail pour transformer les déchets en hydrogène gazeux.

La photosynthèse mène peut-être aussi à la production d'hydrogène gazeux comme sous-produit. Plusieurs scientifiques souhaiteraient impliquer des organismes photosynthétiques (algues, bactéries et qui sait, même des plantes pluricellulaires) dans la production d'hydrogène. En fin de compte, ces organismes tirent leur énergie directement de la lumière du soleil. Pareils organismes devraient alors pouvoir nous assurer un stock pratiquement inépuisable d'hydrogène gazeux, et ce, de façon bon marché.

L'électrolyse de l'eau examinée de plus près

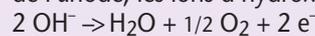
L'expérience est bien connue : nous établissons un courant continu dans un fût d'eau contenant un électrolyte (comme le



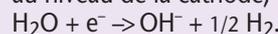
KOH, pour permettre une conduction optimale du courant), et veillons à ce que chaque électrode soit plongée dans un compartiment à part (mais bien reliés entre eux). Assez vite, vous voyez apparaître des bulles, sur chacune des deux électrodes. Si vous récoltez le gaz dans une éprouvette et tenez à proximité une éclisse brûlante, le gaz explose (ce qui démontre la présence d'hydrogène gazeux) ; l'autre gaz fait vivement rougir l'éclisse en bois (il s'agit de l'oxygène).

Nous pouvons expliquer le déroulement de l'électrolyse comme suit.

La solution contient essentiellement des molécules d'eau, ions K⁺ et ions OH⁻. Les ions K⁺ restent inchangés, mais au niveau de l'anode, les ions d'hydroxyde sont oxydés :

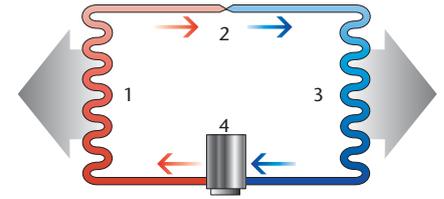
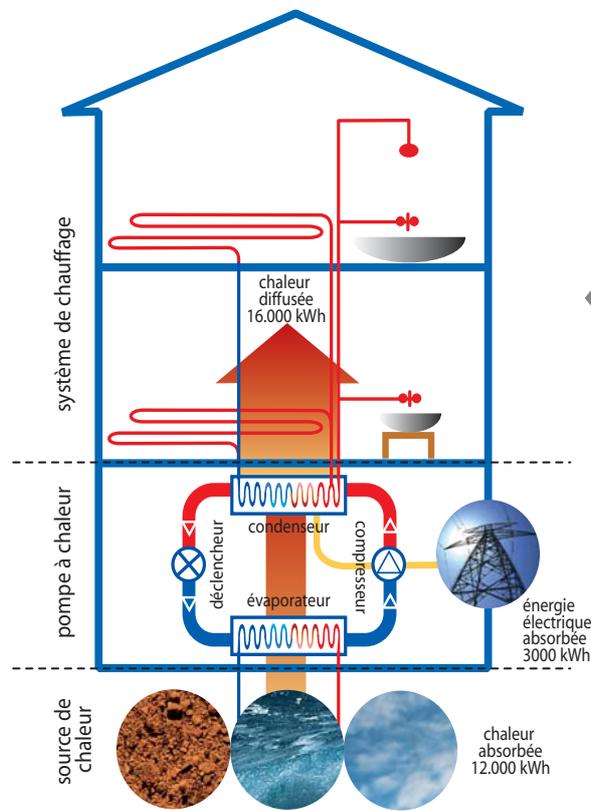


au niveau de la cathode, les molécules d'eau sont réduites :



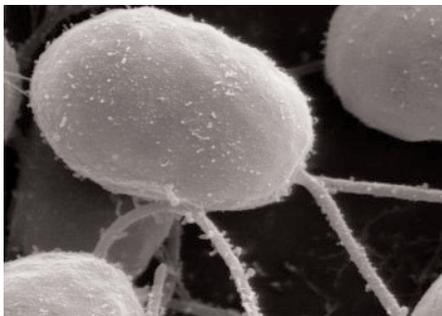
La résultante de ces deux réactions est une fission électrolytique de l'eau : $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}_2$.

La pompe à chaleur



1. Spirale de condensation (dégagement de chaleur)
2. Soupape d'expansion
3. Spirale d'évaporation (prise de chaleur)
4. Compresseur

Malheureusement, la production d'hydrogène est parfois catalysée par une enzyme qui est extrêmement sensible à l'oxygène, et c'est actuellement un des principaux produits de la photosynthèse. Sans une modification génétique approfondie de cette enzyme, la production d'hydrogène gazeux biologique avec la lumière comme source d'énergie est peut-être exclue.



Chlamydomonas

L'électrolyse de l'eau (voir encadré) est une méthode éprouvée pour fabriquer de l'hydrogène gazeux. Le gros avantage est que vous avez uniquement besoin d'eau comme matériau de départ, et qu'outre l'hydrogène, seul de l'oxygène gazeux est formé. Et de cela, personne ne peut s'en plaindre. L'inconvénient toutefois est que l'électricité, jusqu'à nouvel ordre, est encore essentiellement produite à partir de carburants fossiles. Et plus il y a d'étapes et de conversions intermédiaires, et plus il y a de pertes d'énergie. Le rendement d'un moteur qui tourne à l'hydrogène gazeux – produit avec de l'électricité ou de la chaleur, ou par combustion de charbon ou de pétrole – est donc nettement inférieur à celui d'un moteur qui fonctionne directement avec du carburant fossile. La question a déjà été étudiée. Nous devrions pouvoir asso-

cié directement l'hydrogène gazeux à la production d'électricité à partir de turbines éoliennes et de cellules solaires. De cette façon, nous pourrions épargner des carburants fossiles, et nous assurerions un carburant pour nos voitures.

Où en est l'économie de l'hydrogène ?

L'hydrogène gazeux présente déjà quelques avantages évidents. Il est très riche en énergie, et la technologie existe déjà pour utiliser le gaz comme carburant pour notre voiture. Un véhicule qui roule à l'hydrogène, n'émet que très peu, voir aucune, substances nocives et contribue donc à un environnement plus sain. D'autre part, l'hydrogène reste encore momentanément une promesse. Le principal obstacle est qu'il n'existe pas encore de méthode véritablement écologique de fabriquer ce gaz en grandes quantités. Sur la table à dessin se trouvent encore de nouvelles méthodes nécessaires pour l'entreposage requis de ces petites molécules dans un conteneur sûr. Mais une fois que ces problèmes seront réglés, l'avenir verra naître progressivement une économie qui ne sera plus basée sur des carburants fossiles, mais bien sur l'hydrogène. Par conséquent, il y a encore du pain sur la planche.

L'énergie émanant du cœur de la terre

L'énergie dont nous avons parlé jusqu'à présent se fonde sur un apport émanant du soleil. Mais comme vous pouvez le déduire du tableau à la page 15, nous pouvons également extraire de l'énergie en provenance du cœur de la terre. Il

s'agit dans ce cas de l'énergie géothermique. Cette énergie est virtuellement inépuisable : le noyau de la Terre restera encore chaud pendant des milliards d'années, et durant tout ce temps, nous pouvons y puiser de la chaleur. De plus, cette chaleur est présente en abondance : environ 42 terawatts ! Je dirais alors : commençons donc à creuser. Ou peut-être n'est-ce pas aussi simple ?

Pompons un kilowattheure

Les sources d'énergie géothermique nous fournissent par essence de la chaleur, et via cette chaleur, de l'électricité. Que se produise une libération de chaleur, c'est un fait évident. Même au temps des Romains, des sources d'eau chaude étaient utilisées. La technologie moderne prévoit toutefois ce que l'on appelle les pompes à chaleur, à savoir, une sorte de réfrigérateur inversé. Selon la seconde loi principale de la thermodynamique (voir www.tijdschriftmens.eu pour une brève présentation de la thermodynamique en tant que science), la chaleur ne peut se déplacer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. C'est logique : une piscine ne peut geler d'elle-même en été, mais des glaçons dans un cocktail ou un coca fondent quant à eux. Ainsi, si nous sacrifions une certaine quantité d'énergie au processus, et y importons donc de l'énergie supplémentaire, nous pouvons faire geler de l'eau pour la transformer en glaçons en présence d'une température extérieure de 30°C (OK, pour ce cocktail). L'appareil qui le permet s'appelle un surgélateur.

Essayons à présent d'appliquer ce principe à une plus grande échelle. Les pompes



à chaleur vont extraire la chaleur sur des couches plus froides (comme la surface de la terre, les eaux souterraines ou l'air extérieur) et la transmettre en des endroits plus chauds (comme une salle de séjour, un chauffe-eau pour votre salle de bains, etc.). Pour ce faire, elles fonctionnent exactement comme un chauffe-eau solaire avec une matière spéciale, qui est pompée entre la couche plus froide et la couche plus chaude. Ce liquide doit présenter un point d'ébullition bas, et donc se condenser également en présence de basses températures. Commençons à présent juste avant le compresseur (au point 4 sur le schéma). Le liquide en question est présent sous une forme gazeuse. Le compresseur comprimera ce gaz en une masse gazeuse à une haute température. Cette chaleur est dégagée du côté chaud de la pompe, dans le condensateur (1). Les gaz refroidissent fortement et redeviennent liquides. À présent, le liquide passe le long d'un déclencheur ou une soupape d'expansion (2). Lors du passage par cette soupape, la pression diminue de façon spectaculaire (vers le niveau pour le compresseur), de sorte que le liquide devient très froid. Certainement plus froid que le support dont doit être extraite la chaleur. En captant de la chaleur, le liquide s'évapore (3). La masse gazeuse réchauffée arrive finalement au niveau du compresseur, et la boucle est bouclée. La chaleur pompée est ainsi répartie dans l'habitation via le chauffage central, via le chauffage au sol ou via les canaux d'aération, ou comme eau chaude.

L'ensemble de ce processus nécessite naturellement encore un peu d'énergie (pour l'entraînement du compresseur), qui doit être puisée sur le réseau électrique classique. Il ne s'agit cependant tout au

plus que d'un quart, le reste de l'énergie provient simplement gratuitement du sol.

Et le gros avantage ? La température du sol (ou mutatis mutandis, les eaux souterraines ou l'air extérieur) est suffisamment constante, et est surtout en équilibre avec un grand volume de matière de sol. Un apport assez uniforme de chaleur est ainsi garanti.

Du courant à partir de vapeur émanant du plus profond de la terre

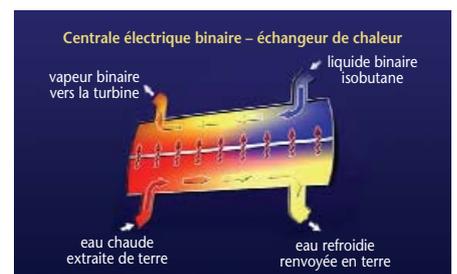
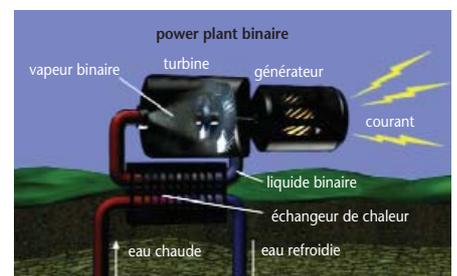
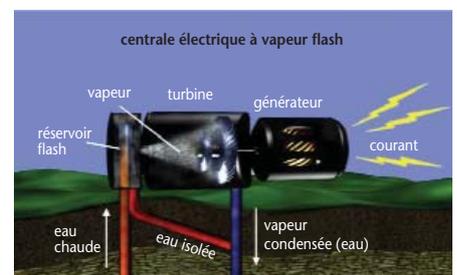
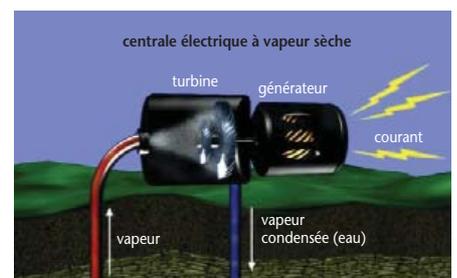
L'électricité est quelque chose d'un peu moins évident. Pour commencer, vous avez besoin de vapeur. Vous la puisez via des trous creusés profondément dans ce que l'on appelle le réservoir géothermique : une couche aquifère très profonde contenant de l'eau qui de par sa nature même est déjà très chaude, ou – mieux encore – de la vapeur. Cette eau est alors pompée vers le haut et utilisée dans une turbine à vapeur à la surface. Là, la chaleur est convertie en électricité. L'eau refroidie retourne dans les profondeurs de la terre, pour y être chauffée à nouveau.

Si nous disposons d'une couche de vapeur, le modèle le plus élémentaire est utilisé : la turbine à vapeur sèche. Celle-ci utilise directement la vapeur chaude (généralement à plus de 235°C). Il s'agit d'un modèle classique, mais pas très largement répandu. Des couches de vapeurs peuvent être percées en tellement d'endroits et il n'existe pas un seul de ces systèmes jusqu'à présent.

Il n'y a pas de vapeur disponible, mais bien de l'eau chaude, c'est pourquoi la turbine à vapeur flash est utilisée. Celle-ci

permet de pomper l'eau chaude. Lorsque celle-ci entre dans la turbine, la pression diminue de façon spectaculaire, de sorte qu'une partie de l'eau se trouve transformée en vapeur. Cette vapeur commandera alors la turbine. Tant les restes de l'eau pompée que la vapeur condensée retournent ensuite vers la couche aquifère chaude pour une utilisation future.

Si l'eau n'est pas suffisamment chaude pour un dispositif de ce type, il est possible également d'envisager avoir recours à une power plant binaire. Dans ce cas, un second liquide est chauffé avec l'eau pompée, via deux circuits imbriqués, mais distincts cependant. Ce second liquide (généralement de l'isobutane ou de l'isopentane) présente un point d'ébullition plus faible, et s'évaporerait donc pour ainsi activer la turbine au gaz. Ce type d'installation est naturellement le type le plus répandu.



Différents types de turbines à vapeur qui transforment la chaleur de la terre en vapeur. Voir texte.

Avantages et inconvénients de notre mère la terre comme radiateur électrique

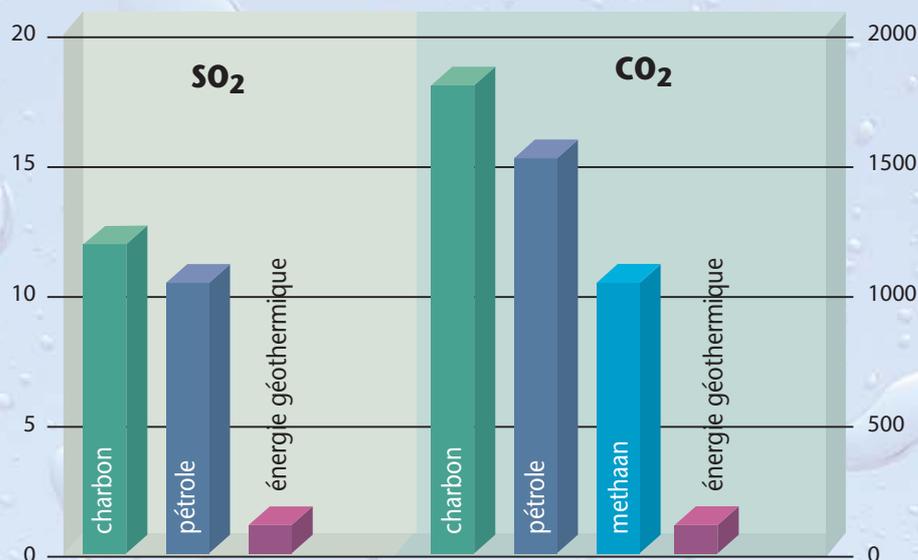
L'installation de pompes à chaleur est certainement très utile, pour les particuliers également, mais un gros investissement initial est toutefois nécessaire. En ce qui concerne la production d'électricité, l'énergie géothermique est toujours disponible et la production de vapeur ne dépend donc pas de la présence de vent ou pas, ou encore d'un rayonnement solaire suffisant susceptible de franchir la couche de nuages. En outre, l'émission de CO₂ ou de SO₂ est minimale (voir graphique), et aucun déchet toxique n'est libéré, comme c'est le cas dans une centrale nucléaire. Le prix de revient semble également être inférieur, et il faut ici aussi tenir compte de subsides, ce qui rend confuse la comparaison avec le prix de carburant fossile. Et le coût principal se situe naturellement au niveau de la construction de l'installation. Le forage de trous de quelques kilomètres de profondeur n'est pas une sinécure.

Le plus gros inconvénient est toutefois que les bonnes couches ne peuvent pas toujours être perforées. Et que se passe-t-il avec notre sous-sol si toutes les maisons d'une grande ville puisent leur chaleur au plus profond de la terre ? La production d'électricité géothermique est donc en gros une technique très sensée... si toutefois elle est possible !

L'eau aussi circule

Enfin, il nous faut encore citer les turbines hydrauliques. Celles-ci n'utilisent pas de gaz, mais bien le courant de l'eau. Tout comme l'éolienne, le moulin à eau est déjà beaucoup utilisé depuis des siècles pour exécuter facilement un travail mécanique. Jusqu'à aujourd'hui, du reste, l'accent a été mis sur la production d'électricité.

Ces turbines constituent le cœur qui bat (ou plutôt, qui tourne) de chaque centrale hydro-électrique. Ces centrales (voir la figure) se trouvent sur des courants et des rivières présentant un haut débit et chute. Parfois, les rivières elles-mêmes sont pourvues d'un barrage pour offrir un courant continu pour la centrale. Comme variante de la centrale hydro-électrique, nous pouvons citer une centrale à pompe ou centrale à réservoir. En soi, ces centrales ne fournissent pas ou ne fournissent que peu d'électricité. Mais elles jouent un rôle important sur le réseau électrique. Pendant les heures creuses, lorsque davantage d'électricité



Production de SO₂ et CO₂ en utilisant différentes sources d'énergie.

est produite que ce qui est nécessaire, ce type de centrale utilise l'excédent pour pomper l'eau vers un bassin situé plus haut. Si la demande est à nouveau plus importante pendant la journée, les vannes sont ouvertes et les turbines tournent pour produire à nouveau de l'électricité avec l'eau qui afflue.

Les marées peuvent également constituer une source d'énergie. Elles se développent sous l'influence de la force d'attraction qu'exercent le soleil et la lune sur les masses d'eau de notre planète. Sur l'ensemble de l'océan, les différences de niveau des eaux sont minimales, mais sur les côtes, ces différences peuvent parfois être très importantes. L'énergie qui met en mouvement ces masses d'eau peut donc également être puisée si l'on dispose de l'installation adéquate. Dans cette installation, l'eau est maintenue derrière un barrage à marée haute, pour ensuite libérer le courant à nouveau via les turbines à eau à marée basse.

L'utilisation de l'énergie de la houle est beaucoup moins évidente. Théoriquement, il est possible d'obtenir de l'énergie à partir des flots, mais dans la pratique, le bénéfice est minimal (voire même inexistant). Les frais pour la construction et l'entretien de ces centrales dépassent dès lors les revenus. Une installation du professeur Wells, d'Irlande du Nord, transforme le mouvement des vagues via une chambre centrale en un courant atmosphérique qui entre et sort de la chambre. La seule entrée pour l'air s'effectue via une turbine, qui est donc ainsi activée.

Dans l'ensemble, l'eau constitue un moyen de production d'électricité écologiquement responsable. Le relief de la région est toutefois très important en ce

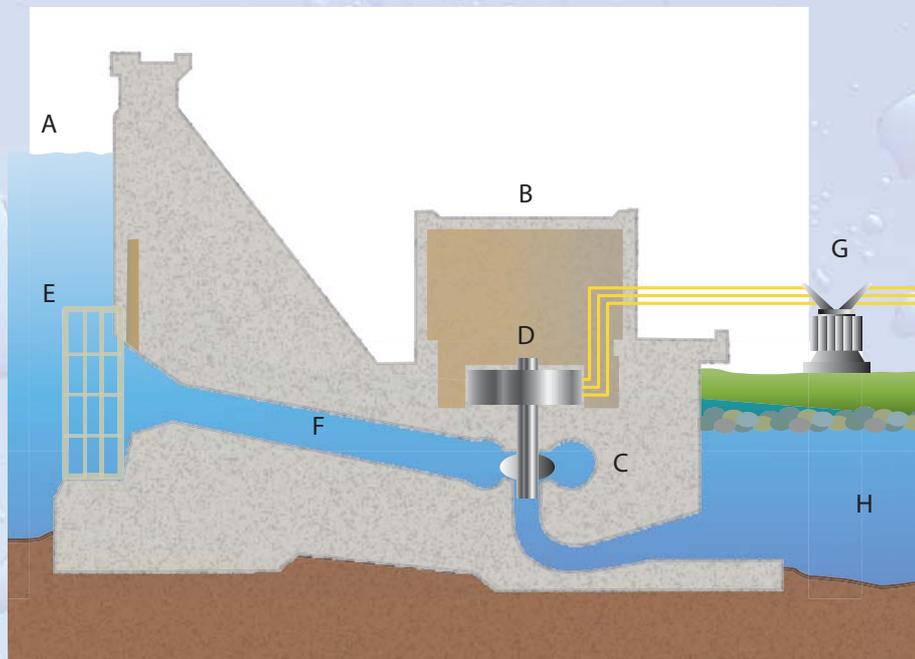
sens. La Norvège fabrique 99 % de son électricité via des centrales hydro-électriques, en Flandre, l'eau n'est absolument pas significative. Le plus gros problème se situe au niveau de l'installation des barrages et lacs de retenue. Ceux-ci peuvent avoir un impact écologique énorme sur la région, car un domaine naturel très riche se développe sous l'eau. Pour ne pas parler de l'obligation de déplacer des villages entiers...

Pas encore d'alternative instantanée ?

Nous n'allons pas du jour au lendemain avoir à notre disposition des éoliennes ou des réacteurs à fusion. Cela veut-il dire qu'entre-temps, nous devons laisser les choses suivre leur cours ? Absolument pas. Il existe encore d'autres méthodes pour parvenir progressivement à une production d'énergie durable. Pour utiliser plus efficacement ce qui est déjà produit actuellement, et à chaque étape, si petite soit-elle, faire preuve d'enthousiasme. Deux exemples...

De la chaleur au courant – la nouvelle centrale thermique

Nous avons déjà décrit le fonctionnement d'une centrale thermique dans MENS 35. Mais dans ce domaine également, les améliorations nécessaires sont réalisées au cours des premières années, pour produire plus d'énergie avec la même quantité de matériau à brûler. Les centrales électriques présentent un rendement électrique d'environ 40 %. Cela signifie que seulement 40 % de l'énergie dans la centrale est stoppée, et transformée en énergie électrique, le reste étant libéré sous la forme de chaleur. Jusqu'il y a peu, cette chaleur était perdue,



CENTRALE HYDRO-ÉLECTRIQUE : A - réservoir, B - centrale électrique, C - turbine, D - générateur, E - entrée, F - conduit, G - câbles haute tension, H - rivière

mais finalement, la chaleur est une forme d'énergie qui peut également être utilisée pour d'autres applications. Et ce faisant, nous pouvons économiser du carburant. La nouvelle formule magique est alors 'combinaison chauffage-force motrice', ou encore la production combinée de chaleur et d'électricité. La chaleur peut par exemple servir à chauffer des bâtiments. Certains bâtiments de l'université de Gand l'utilisent par exemple. En moyenne, les centrales thermiques épargnent environ 12 % d'énergie par rapport à la production séparée de la même quantité d'électricité sans réinvestissement de la chaleur provoquée.

En été, les besoins en matière de chauffage des bâtiments sont nettement moindres bien sûr. À ce moment, la chaleur est encore toujours évacuée via les tours de refroidissement. Une attention est également accordée à la chaleur qui est alors produite et stockée dans les couches aquifères dans le sol, de manière à être à nouveau disponible en hiver.

Des certificats énergétiques

Comment pousser les entreprises à produire de l'électricité de manière durable ? En tant qu'autorités, il est bien sûr possible d'établir des amendes à l'encontre des producteurs d'électricité qui ne respectent pas certains quotas. Et ces quotas existent : chaque fournisseur d'électricité est obligé, depuis le 1er janvier 2002, de fabriquer une partie minimale du courant vendu à partir de sources d'énergie renouvelables. Cette part minimale est passée de 2 % en 2004 à 6 % en 2010. Le fournisseur peut alors également produire de l'électricité de manière durable, ou acheter celle-ci auprès d'un autre producteur.

Mais comment prouver cela ? Il n'y a aucune étiquette sur les électrons qui sortent de notre prise de courant. Donc, celui qui produit du courant à partir de sources durables ou via une combinaison chauffage-force motrice, reçoit des autorités un certificat par mégawattheure de courant. Les fournisseurs d'électricité peuvent acheter ces certificats auprès des producteurs. Les producteurs connectent leur centrale sur le réseau et le fournisseur a une preuve qu'il a investi dans la production de courant vert. Plus encore, si un fournisseur d'électricité ne peut émettre suffisamment de ces certificats, alors il paye une amende. La valeur de ce certificat est fixée par le marché. Le marché des certificats a vu le jour suite à l'établissement de l'obligation pour les fournisseurs d'électricité d'établir chaque année un pourcentage croissant de certificats de fourniture thermique. Ils doivent donc bien acheter, pour ne pas se retrouver avec des amendes colossales à payer. Le prix d'un certificat se situera donc à proximité de l'amende par mégawatt / heure. Pour encourager encore davantage à produire du courant vert, un prix minimum a même été établi pour un certificat émis par les autorités. Celui-ci est payé par les fournisseurs d'électricité au producteur... et est naturellement reporté sur le client.

Et la lumière fut...

Et c'est ainsi que le rideau tombe sur la trilogie énergétique de MENS. Au fil d'une cinquantaine de pages, nous vous avons fait découvrir l'une des plus importantes questions de notre temps : où puisons-nous notre énergie aujourd'hui et qu'en sera-t-il demain ? Et comment faire cela de manière durable - en prêtant attention aux besoins des

générations qui nous succéderont ? Aujourd'hui, la réponse est simple : tant notre électricité que le carburant de nos voitures, nous les puisons dans les résidus d'animaux et de plantes datant de millions d'années, bref, des carburants fossiles. Ce n'est pas soutenable, pour plusieurs raisons. Certains avancent une pénurie des sources de ces carburants. D'autres font valoir la nécessité pour l'Occident d'être davantage indépendant de la poudrière politique qu'est le Moyen-Orient... où se trouvent les principales réserves mondiales de carburants fossiles. D'autres encore soulignent l'impact profond de l'utilisation de ces carburants sur le climat.

À l'avenir, la réponse sera toutefois moins simple. À présent, nous utilisons une ou deux sources d'énergie, présentant chacune ses avantages et ses inconvénients ; à l'avenir, ce nombre va peut-être passer à cinq, six... cette fois encore, chacune avec leurs propres caractéristiques. Chaque forme de production d'énergie connaît en effet ses propres inconvénients (dans le cas contraire, nous aurions déjà opté depuis longtemps pour cette forme positive à 100 %) : frais, possibilités techniques, pénurie, émission de CO₂, déchets, pas de courant continu, culture d'aliments, etc.

En outre, un problème énergétique est un problème environnemental (émission de CO₂, déchets, pénurie, érosion, etc.), que nous devons résoudre en apportant une solution au problème énergétique. Via la technologie, l'innovation et l'économie. Nous allons donc devoir utiliser une pléiade de carburants alternatifs, certains simplement pour la production d'électricité (comme les cultures énergétiques, les cellules solaires et les turbines éoliennes), d'autres comme carburant pour nos voitures (comme l'hydrogène), et le chauffage de nos maisons devra avoir recours à des technologies créatives telles que des chauffe-eau solaires et des pompes à chaleur. Néanmoins, ces composantes essentielles de notre bien-être - imaginez-vous un monde où l'électricité ne serait disponible qu'au compte-gouttes, où les voitures seraient devenues si chères qu'on ne les utiliserait plus qu'en cas d'absolue nécessité, où les avions resteraient au sol par manque de carburant. Répondre aux besoins énergétiques de demain - un défi d'intérêt vital !



"MENS" en rétrospective

- 10 La Chimie: source de la vie
- 11 La viande, un problème ?
- 12 Mieux vaut prévenir que guérir
- 13 Biocides, une malédiction ou une bénédiction ?
- 14 Manger et bouger pour rester en pleine forme
- 15 Pseudo-hormones : la fertilité en danger
- 16 Développement durable : de la parole aux actes
- 17 La montée en puissance de l'allergie
- 18 Les femmes et la science
- 19 Viande labellisée, viande sûre ! ?
- 20 Le recyclage des plastiques
- 21 La sécurité alimentaire, une histoire complexe.
- 22 Le climat dans l'embarras
- 23 Au-delà des limites de la VUE
- 24 Biodiversité, l'homme fauteur de troubles
- 25 La biomasse : L'or vert du 21ème siècle
- 26 La nourriture des dieux : le chocolat
- 27 Jouer avec les atomes La nanotechnologie
- 28 L'or bleu : un trésor exceptionnelle !
- 29 Animal heureux, homme heureux
- 30 Des souris et des rats, petits soucis et grands tracas
- 31 Illusions à vendre
- 32 La cigarette (ou) la vie
- 33 La grippe, un tueur aux aguets ?
- 34 Vaccination : bouée de sauvetage ou mirage ?
- 35 De l'énergie à foison
- 36 Un petit degré de plus. Quo vadis, la Terre?



"MENS" à venir :

ADHD

Loterie Nationale
 créateur de chances 

 **Universiteit
 Antwerpen**



L'Université de Barcelone, sous la direction du professeur Baldasano, a réalisé une étude comparant les émissions de CO₂ et la consommation en énergie de châssis de divers matériaux, et ce de la production des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit. Sources d'énergie: 35% charbon, 30% nucléaire, 15 % gaz, 10 % hydraulique, 10% divers. Durée de vie des fenêtres: 50 ans. La période 'utilisation' de la fenêtre est bien identifiée comme étant la période où l'impact gain / perte de CO₂ et d'énergie est la plus grande. D'où l'intérêt d'une fenêtre bien conçue avec des caractéristiques isolantes les plus performantes. La fenêtre PVC contenant 30% de PVC recyclé a consommé le moins d'énergie (1.740 kWh) et provoqué le moins d'émissions de CO₂ (730 kg).



**NE LAISSEZ PAS RENTRER
 D'ÉNERGIVORES CHEZ VOUS.**
www.energivores.be

