

PROJET DE COMMUNICATION

Enseignant responsable : Robert LANKESTER

LES NOUVELLES ÉNERGIES UNE ALTERNATIVE CREDIBLE?



SOMMAIRE

I) Recherche et justification du thème

Présentation générale du thème	4
Objet d'étude	4
Argumentation	4
Définition d'une problématique	4

II) Perspectives

Objectifs	5
Plan provisoire	5

III) Organisation

Bibliographie	6
Gestion du travail – Fonctionnement du groupe	6

IV) Présentation des énergies actuelles et de leurs inconvénients

La fission	7
------------	---

V) Présentation des nouvelles énergies et comparaison

VI) Applications possibles, réalisables

I) Recherche et justification du thème

I) Présentation générale du thème

L'énergie est aujourd'hui un problème majeur pour notre civilisation : la demande croissante nous conduit vers un épuisement certain des ressources naturelles, alors que nous en sommes plus que jamais dépendants. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver des alternatives crédibles pour les années futures. Nous assistons ainsi depuis quelques années au développement de nouveaux moyens de production dits « propres ». En effet, l'environnement est également au cœur de nos préoccupations, du fait d'un problème de pollution sans précédent causé par une utilisation exagérée des ressources.

Objet d'étude

Nous avons donc décidé de présenter ces nouvelles énergies, leurs inconvénients et leurs avantages, afin d'analyser leur capacité à succéder aux énergies actuelles.

Argumentation

Nous avons choisi ce sujet car nous estimons qu'il s'agit d'un problème majeur auquel nous devons trouver des solutions durables, afin de préserver notre environnement, sans toutefois freiner le développement de notre société. Il nous a donc paru essentiel de vous présenter ces énergies dites renouvelables, qui feront partie intégrante de notre futur : en effet, la transition vers ces nouvelles ressources semble inévitable. De plus, leur développement et leur intégration dans notre vie courante passent par des campagnes d'information plus importantes auprès de la population : elle seule peut pousser les industriels à investir de façon plus significative. Il ne faut pas oublier que les ressources naturelles ne sont pas inépuisables, et que nous ne sommes pas capables d'exploiter plus de 60 % d'un puits de pétrole, mais aussi que la demande chinoise et des pays émergents sont en constante augmentation...

Définition d'une problématique

- Ces nouvelles énergies peuvent-elles constituer une alternative crédible aux énergies actuelles ?
- Sont-elles exploitables dans un futur proche ? Quelles sont les applications possibles ?
- Quel avenir pour nos énergies actuelles ?
- Quel peut être l'impact sur notre environnement (positif ou négatif)?

II) Perspectives

Objectifs

Notre objectif est de démontrer que nous pouvons nous passer des énergies fossiles telles que le pétrole et l'uranium, et faire prendre conscience à notre entourage qu'il s'agit d'un problème de société. Il est essentiel que chacun se préoccupe de la planète afin de préserver ce qui n'est pas détérioré ou détruit. Il s'agit de conséquences à moyen et long terme.

Plan provisoire

- Introduction
- Présentation des énergies actuelles et de leurs inconvénients
- Présentation des nouvelles énergies et comparaison
- Applications possibles, réalisables
- Conclusion

III) Organisation

Bibliographie

www.inti.be/ecotopie

www.pozza.org

www.cea.fr

www.auto-innovation.org

www.grainvert.com

www.wikipedia.org

www.planetecologie.org

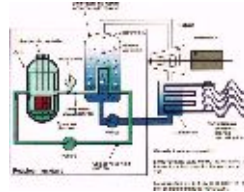
Gestion du travail – Fonctionnement du groupe

Chaque membre du groupe sera chargé d'étudier une énergie, ce qui aboutira à une mise en commun des travaux pour trouver une réponse crédible à la problématique.

IV) Présentation des énergies actuelles et de leurs inconvénients

La fission

L'énergie nucléaire est localisée dans les [noyaux des atomes](#). Ces noyaux, cent mille fois plus petits que les atomes eux-mêmes, sont constitués de protons et de neutrons, très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison au sein des noyaux, des protons et neutrons par des forces très intenses est la source de l'énergie nucléaire. Une réaction nucléaire, en transformant les édifices des noyaux atomiques, peut s'accompagner d'un dégagement de chaleur. Dans les centrales nucléaires la réaction nucléaire utilisée est la fission.



Principe d'un réacteur à eau sous pression (REP) :

La fission du noyau

On dit qu'un noyau lourd "fissionne" s'il se fragmente, de façon spontanée ou provoquée, en deux ou plusieurs autres noyaux plus légers. Prenons l'exemple d'un noyau d'[uranium 235](#). S'il capture un neutron lent (de faible énergie) il se brise aussitôt, donnant naissance à deux noyaux de masses plus faibles. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un noyau d'uranium se comporte comme une goutte de liquide ; l'énergie apportée par le neutron incident déforme la goutte ; la répulsion entre les protons de même charge électrique l'emporte alors sur les forces nucléaires attractives de courte portée, entraînant la fission. Lors de ce processus, deux ou trois nouveaux neutrons sont émis et de l'énergie est libérée. Ces neutrons peuvent à leur tour briser d'autres noyaux d'uranium 235, qui donneront naissance à d'autres neutrons qui briseront d'autres noyaux qui ... Cette multiplication alimente une réaction en chaîne, capable de provoquer la fission d'un nombre considérable de noyaux. L'énergie libérée est de l'ordre de 200 [MeV](#) par fission, ce qui est énorme en comparaison des énergies dégagées par les réactions chimiques (quelques [eV](#)) ; elle est emportée par les noyaux fragments sous forme d'énergie cinétique. Au sein d'un combustible nucléaire, ces fragments, immédiatement ralentis, échauffent le milieu ambiant. Cette chaleur est utilisée pour produire de la vapeur d'eau et entraîner une turbine et un alternateur. Dans les [centrales nucléaires](#), la réaction en chaîne est contrôlée, c'est-à-dire stabilisée à un niveau donné. Dans les bombes atomiques à fission, dite «bombes A », on vise au contraire à l'amplifier. La fission de tous les noyaux d'un kilogramme d'uranium produit autant d'énergie que la combustion de 2500 tonnes de charbon.

Les sources d'[uranium](#)

Il est exceptionnel de disposer d'uranium 235 pur. L'uranium naturel est un mélange des isotopes 235 (0,7%) et 238 (99,3%). Or la fission de l'uranium 238 ne se produit que pour des neutrons très énergétiques, et le plus souvent l'uranium 238 absorbe sans fission le neutron qui l'a frappé pour donner ensuite deux décroissances β du plutonium 239. Les neutrons d'énergie faible (moins de quelques électronvolts) sont peu absorbés par l'uranium 238, mais brisent facilement les noyaux d'uranium 235. Lorsqu'on ne dispose que d'uranium naturel ou d'uranium faiblement enrichi en [isotope](#) 235, il est nécessaire, pour pouvoir entretenir une réaction en chaîne, de

ralentir les neutrons au moyen d'un milieu « modérateur » sur les noyaux duquel ceux-ci perdent leur énergie par chocs successifs. Selon l'enrichissement en isotope 235, on utilise comme modérateur le deutérium, le graphite ou l'hydrogène de l'eau, très bon modérateur mais légèrement absorbant des neutrons.

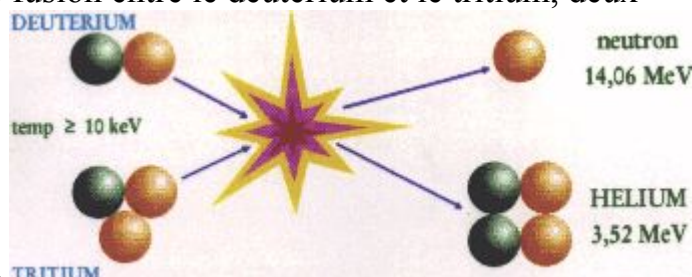
Fusion

Une réaction thermonucléaire

Un autre processus nucléaire est envisagé pour produire de l'énergie. C'est la **fusion nucléaire**. Deux noyaux atomiques légers peuvent, en se fondant l'un dans l'autre, former un noyau plus lourd. Lorsqu'une telle réaction se produit, la masse du noyau final est moindre que la somme des masses des deux noyaux initiaux. En vertu de l'équivalence masse-énergie représentée par la célèbre équation d'Einstein $E=mc^2$, un tel « [défaut de masse](#) » se traduit par une libération d'énergie, de concentration (énergie libérée par gramme de matière) bien plus élevée que celle que peut donner une réaction de fission. Les réactions de fusion ont lieu entre des noyaux chargés positivement. Elles ne se produisent que si la répulsion électrostatique entre ces noyaux est vaincue, ce qui suppose que le milieu soit porté à une température très élevée. Voilà pourquoi l'on dit de la fusion qu'elle est une réaction « thermonucléaire ». De telles réactions thermonucléaires sont à l'œuvre dans le Soleil et dans les étoiles.

Une réaction à maîtriser

Alors que la fission des noyaux lourds d'uranium est entrée dans le domaine industriel, la fusion contrôlée, beaucoup plus difficile à obtenir, n'est pas encore maîtrisée. Les espoirs de production d'énergie reposent actuellement sur la réaction de fusion entre le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Cette réaction aboutit à



la formation d'un noyau d'hélium et à la libération d'un neutron. L'énergie qu'elle engendre est emportée sous forme d'énergie cinétique par les produits de la réaction. Pour produire de l'énergie par la fusion, il faut maintenir le mélange de deutérium et de tritium à

une température de l'ordre de cent millions de degrés. Dans ces conditions, les électrons ne sont plus liés aux noyaux, et la matière est sous forme d'un gaz d'ions et d'électrons libres, appelé plasma. Pour former ce plasma et le conserver à une température aussi élevée, il faut lui fournir de l'énergie. Si l'on veut parvenir à une production nette d'énergie, l'énergie dégagée par les réactions de fusion au sein du plasma doit être supérieure à celle qui est nécessaire pour créer et entretenir les conditions thermonucléaires dans lesquelles ces réactions de fusion peuvent avoir lieu. L'étape suivante est de réaliser l'auto-entretien des réactions de fusion.

LES DÉCHETS RADIOACTIFS.

Le tri et le stockage des déchets radioactifs.

Tous les déchets radioactifs n'étant pas identiques, ils sont classés selon deux critères en vue de leur stockage :

- leur niveau d'activité, c'est-à-dire l'intensité du rayonnement, qui conditionne l'importance des protections à utiliser contre la radioactivité ;
- leur période radioactive qui permet de définir la durée de leur nuisance potentielle.

On distingue ainsi :

- les déchets à vie courte, de faible et moyenne activité. Ils représentent 90% des déchets radioactifs produits en France. Leur période radioactive n'excède pas 30 ans, c'est-à-dire qu'au bout de 300 ans (10 périodes), ces déchets ont perdu presque toute leur activité. Ils sont compactés dans des fûts en acier ou en béton qui sont stockés dans des centres de stockage de surface. Il en existe deux en France, à la Hague (Manche) et à Soulaines (Aube). leur gestion est assurée par l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) ;
- les déchets à vie longue et/ou de haute activité (10% du volume total). Leur décroissance radioactive s'étend sur plusieurs milliers voire centaines de milliers d'années. Ils sont coulés dans du bitume ou du verre. En France, leur devenir fait l'objet d'une loi votée en 1991. L'une des options envisagées est le stockage en formation géologique profonde. Elle sera étudiée grâce à la réalisation de deux laboratoires souterrains. Les autres options sont leur transformation en déchets radioactifs à vie plus courte en cassant les noyaux en d'autres noyaux plus petits (cette opération s'appelle la transmutation) ou les procédés de conditionnement et l'entreposage de longue durée en surface. En attendant une décision finale, ils sont entreposés en surface à la Hague et à Marcoule.

La recherche sur les déchets à vie longue.

La protection de l'homme et de son environnement fait l'objet de recherches visant à mettre au point des procédés et technologies destinés à diminuer sans cesse les risques liés à la radioactivité.

La réduction du volume des déchets solides et liquides est au premier rang de ces objectifs de recherche et développement.

Les trois principaux thèmes d'étude sont :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains.

V) Présentation des nouvelles énergies et comparaison

La fusion

La fusion nucléaire contrôlée :
une source d'énergie propre et inépuisable ?

La fusion nucléaire : la source d'énergie des étoiles

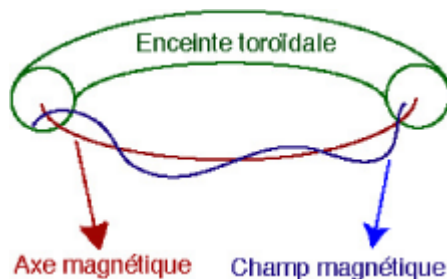
La **fusion nucléaire** constitue le mécanisme à l'origine du rayonnement des étoiles et en particulier du Soleil. En effet, au sein des étoiles, les noyaux légers fusionnent et produisent des noyaux plus lourds. Au cours de cette réaction de fusion, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux légers d'origine. La différence de masse, en vertu de la célèbre relation d'Einstein, $E=mc^2$, est alors convertie en énergie. On estime ainsi que, dans le Soleil, pas loin de 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transformés en 596 millions de tonnes d'hélium chaque seconde. La différence est alors convertie en énergie et est à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons.

Bien que l'énergie libérée par la fusion nucléaire soit considérable, les réactions de fusion ne se produisent pas spontanément, du moins dans les conditions de température et de pression auxquelles nous sommes habitués. Ainsi, la probabilité d'observer une réaction de fusion entre deux noyaux d'hydrogène à la surface de la terre est quasiment nulle. En effet, pour fusionner, les noyaux, qui sont chargés positivement, doivent d'abord vaincre leur tendance naturelle à se repousser. Ceci est possible lorsque la matière est dans des conditions extrêmes comme au coeur du Soleil (pression énorme et température de plusieurs millions de degrés).

Comment domestiquer la fusion nucléaire ?

Produire sur Terre des conditions propices à la réalisation des réactions de fusion constitua rapidement un objectif important de recherche, compte tenu de l'immense potentiel énergétique de ce phénomène et de la très grande abondance de l'hydrogène. La bombe à hydrogène constitua la première 'réussite' dans ce domaine. Dans cette application militaire, les conditions extrêmes de température et de pression sont obtenues grâce à une amorce constituée d'une bombe atomique de fission. Heureusement, l'essentiel des recherches actuelles suit une approche plus pacifique, qui a pour but de contrôler les réactions de fusion et de domestiquer l'énergie de fusion. La **fusion nucléaire contrôlée** consiste ainsi à tenter de reproduire sur Terre des conditions permettant d'exploiter de manière industrielle cette source d'énergie.

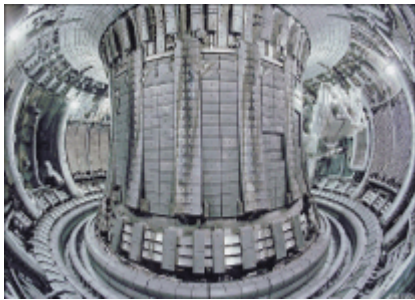
Cliquez sur l'image pour l'agrandir



Représentation schématique du champ magnétique utilisé dans les tokamaks.

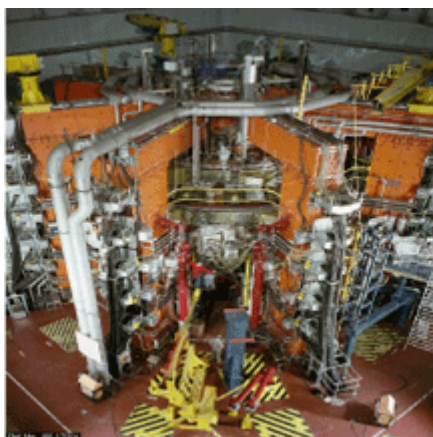
Dans les conditions de température nécessaires pour obtenir la fusion nucléaire, soit plusieurs millions de degrés, les atomes sont alors séparés en leurs constituants fondamentaux - électrons et noyaux chargés positivement - et forment un gaz chaud appelé "**plasma**". Ces températures excluent l'utilisation d'un récipient pour maintenir le plasma dans un espace suffisamment petit pour qu'un nombre important de collisions entre noyaux légers donne lieu à des réactions de fusion. La solution la plus souvent retenue consiste alors à soumettre le plasma à un champ magnétique intense de géométrie toroïdale (voir ci-contre). Les particules chargées composant le plasma suivent alors approximativement le champ magnétique et ne peuvent explorer qu'une partie limitée de l'espace. Ceci favorise les collisions entre les noyaux légers tout en limitant le contact entre le plasma et les parois du réacteur. Cette technique est appelée le **confinement magnétique du plasma**. Les réacteurs de fusion basés sur cette approche sont connus sous le nom de **tokamak** et apparaissent aujourd'hui comme les plus prometteurs.

Cliquez sur l'image pour l'agrandir



Vue intérieure du plus grand tokamak européen, le JET (Joint European Torus), situé à Oxfordshire au "Culham Science Centre". La hauteur de l'enceinte intérieure est de 4,2 m. (photograph courtesy of EFDA-JET).

Cliquez sur l'image pour l'agrandir



Vue extérieure du JET (photograph courtesy of EFDA-JET).

Les chercheurs se sont également rendu compte que les probabilités de réaction de fusion entre noyaux d'hydrogène étaient bien trop faibles pour envisager l'exploitation industrielle de phénomènes identiques à ceux qui se produisent au coeur du Soleil. Par contre, d'autres réactions, basées sur le même principe de fusion de noyaux légers, sont moins difficiles à réaliser. Ainsi, la réaction qui semble la plus favorable dans les tokamaks serait la fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium. Le deutérium et le tritium sont deux isotopes de l'hydrogène, c'est-à-dire des éléments dont les noyaux des atomes contiennent le même nombre de protons que l'hydrogène (un seul) mais pas le même nombre de neutrons (un pour le deutérium et deux pour le tritium au lieu de zéro pour l'hydrogène). Le résultat de cette réaction est un noyau d'hélium et un neutron. Le noyau d'hélium étant chargé, il va être soumis au champ magnétique du tokamak et restera ainsi confiné dans l'enceinte du réacteur. Les collisions entre les noyaux d'hélium et autres constituants du plasma devraient permettre de maintenir une température suffisamment élevée dans le réacteur. Les neutrons n'étant pas porteur de charge électrique seront insensibles au champ magnétique et quitteront le tokamak à très grande vitesse. Leur énergie sera alors récupérée et transformée en chaleur qui, à son tour, sera transformée en électricité.

La fusion : les avantages du nucléaire sans ses inconvénients

La fusion présente trois avantages majeurs. D'abord, elle utilise comme combustible le deutérium dont les réserves terrestres sont quasiment inépuisables et le tritium relativement facile à produire ; son exploitation industrielle permettrait donc de résoudre, pour de nombreux millénaires, les problèmes liés à notre approvisionnement énergétique. En effet, les chiffres sont éloquentes : l'exploitation d'une centrale électrique de 1000 MW basée sur la combustion du charbon nécessite de brûler pas loin de 3 millions de tonnes de charbon par an. A même puissance, une centrale fonctionnant sur le principe de la fusion nucléaire ne consommerait qu'un quart de tonne d'un mélange basé pour moitié de deutérium et pour moitié de tritium. Alors que les effets liés à la combustion de combustibles fossiles (charbon et pétrole par exemple) risquent d'altérer à long terme nos conditions de vie, le développement d'une source d'énergie ne produisant aucun gaz à effet de serre rencontre évidemment un intérêt grandissant. Le deuxième avantage majeur de la fusion est sans conteste la sécurité inhérente à ce phénomène. D'abord, seule la quantité de combustible nécessaire au fonctionnement du réacteur (à peine quelques grammes) est injectée dans

l'enceinte du tokamak. Ainsi, si l'état du réacteur déviait trop des conditions normales d'exploitation, il est très simple de le mettre hors service rapidement. De même, l'injection accidentelle d'éléments indésirables (comme de l'air) dans l'enceinte, stopperait immédiatement les réactions de fusion. En fait, les quantités de plasma qui se trouveront au sein du réacteur seront si faibles qu'un incident, aussi improbable soit-il, ne pourrait jamais entraîner un événement catastrophique du type d'une explosion et limiterait ses effets à la mise hors service du réacteur. Plus important peut-être est la propreté relative de la fusion nucléaire. En effet, le deutérium est un isotope qui se trouve à l'état naturel et dans une fraction non négligeable dans l'hydrogène qui constitue l'eau. Sa production est donc aisée et non polluante. Le tritium, quant à lui, est un élément radioactif. Il se dégrade en émettant des rayonnements énergétiques. Cependant, son temps de vie, c'est-à-dire la période pendant laquelle il émet des rayonnements potentiellement dangereux, est très courte (de l'ordre de la dizaine d'année). De plus, la réaction de fusion ne génère pas, directement ou indirectement, de sous-produits radioactifs de longs temps de vie. Les interactions entre les neutrons rapides qui s'échappent de l'enceinte du réacteur et les parois généreront certainement des déchets radioactifs. En fait, une partie importante du tritium consommé dans les réacteurs de fusion pourrait directement être produite par les interactions entre ces neutrons fortement énergétiques et le lithium constituant certains éléments des parois du réacteur. Ainsi, le seul combustible radioactif serait produit et consommé directement dans le réacteur. De plus, contrairement aux déchets radioactifs liés aux centrales classiques, ceux produits par la fusion auront un temps de vie court. Leur nuisance potentielle pourra alors facilement être gérée par un stockage et une surveillance à court ou moyen terme. Ainsi les déchets de la fusion ne constitueront ni un fardeau ni un danger pour les générations qui nous suivront.

Cliquez sur l'image pour l'agrandir

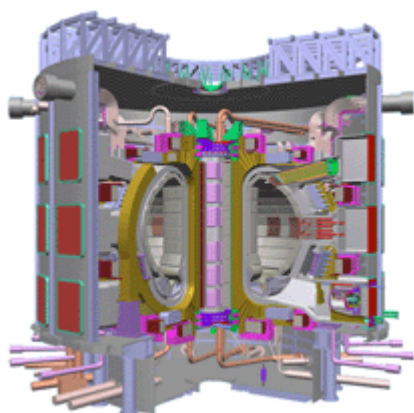


Schéma du projet de réacteur de fusion international (published with kind permission of ITER).

A quand la fusion ?

Alors que les avantages liés à l'exploitation industrielle de la fusion nucléaire sont clairs tant du point de vue environnemental que stratégique (les combustibles sont en effet accessibles à tous et en quantité quasiment inépuisable), il semble naturel de s'interroger sur les raisons qui font que cette source d'énergie n'est pas encore exploitée aujourd'hui. Les raisons sont multiples. D'abord, la faisabilité de l'exploitation industrielle de la fusion nucléaire, bien que considérée comme acquise par de nombreux chercheurs, n'a pas encore été démontrée expérimentalement. Des réactions de fusion ont bien été produites dans des tokamaks. Ainsi, en 1997, le tokamak européen JET (situé près d'Oxford en Angleterre) est parvenu à produire une énergie de fusion de 16 MW. Cependant, en raison de la taille réduite des réacteurs actuels, le bilan énergétique de ces réactions ne permet pas encore leur exploitation. D'autre part, la construction d'un réacteur de fusion produisant suffisamment d'énergie est une tâche difficile et coûteuse. Ainsi, bien que le coût des combustibles soit très raisonnable, les installations techniques nécessaires à la construction et à l'exploitation d'un réacteur de fusion impliquent des investissements très lourds. De plus, la logique économique actuelle n'intègre pas (ou très faiblement) les coûts liés aux impacts environnementaux des différentes sources d'énergie. Cette situation fait apparaître, de manière artificielle, les moyens traditionnels de production d'énergie comme étant plus compétitifs. Il semble néanmoins que les progrès techniques et scientifiques en matière de fusion nucléaire, ainsi que l'épuisement progressif des réserves de charbon et de pétrole, transformeront vers la moitié de ce siècle la fusion nucléaire en une option énergétique viable. De plus, cette option garantira un approvisionnement énergétique tout à la fois durable et respectueux de l'environnement. Une des étapes importantes dans le développement de nos connaissances en fusion sera la construction, qui devrait être décidée prochainement, d'un tokamak capable de produire une énergie de fusion de l'ordre de 500MW : **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor). Ce projet, issu d'une collaboration internationale entre les Etats-Unis, le Japon, la Russie et l'Europe, devrait permettre de cerner de mieux en mieux les contraintes liées à

La recherche en fusion : un programme européen auquel participe l'ULB

Les recherches effectuées dans le cadre de la fusion contrôlée ont notamment pour tâche de décrire le comportement collectif des électrons et des noyaux chargés positivement qui constituent les plasmas lorsque ceux-ci sont soumis à de forts champs magnétiques. Des phénomènes complexes de transport de matière et d'énergie se produisent alors au sein du plasma. D'une part, les collisions ont tendance à faire dévier les constituants du plasma des trajectoires que l'on tente de leur imposer (le long du champ magnétique). D'autre part, les conditions extrêmes nécessaires pour obtenir la fusion contrôlée engendrent de nombreuses instabilités menant à un état turbulent du plasma. Le plasma est alors dans un état apparemment chaotique difficile à décrire et à modéliser. La dispersion du plasma qui accompagne cet état turbulent limite le temps de confinement et, par conséquent, les performances des réacteurs. La richesse et la complexité des phénomènes physiques rencontrés au sein des plasmas ont motivé une recherche active à l'ULB depuis les années soixante.

Au niveau de l'Europe, la coordination des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée démarra en 1957, avec la création de l'EURATOM. En effet, le Traité de Rome assigne à l'EURATOM toutes les activités liées aux applications énergétiques de l'atome, à l'étude de la fusion nucléaire contrôlée ainsi qu'aux applications touchant aux radio-isotopes. En Belgique, les recherches sur le confinement magnétique des plasmas en vue de la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée sont menées depuis 1969 dans le cadre d'un contrat d'association EURATOM - Etat Belge. L'unité de Physique Statistique et Plasmas de l'ULB constitue l'une des trois branches de cette association avec le Laboratoire de Physique des Plasmas de l'Ecole Royale Militaire et le Centre d'Etude Nucléaire de Mol.

La réaction de fusion

Définition :

Sens général

Le mot fusion vient du latin, *fusio* (fondre). Au sens général, une fusion est une réunion, une combinaison de plusieurs éléments pour n'en former qu'un seul (exemple : fusion de deux entreprises).

En physique nucléaire

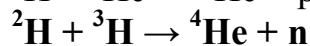
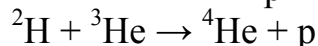
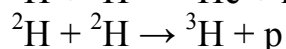
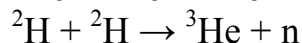
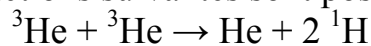
En physique nucléaire, il s'agit d'une réunion de deux noyaux atomiques en un seul, avec éventuellement éjection de particules (neutron, proton, etc).

Choix des atomes et de la réaction :

Nous venons de voir précédemment qu'il faut faire fusionner, c'est à dire, coller entre eux des atomes. Mais quels atomes ?

En théorie, les réactions de fusion sont possibles avec tous les noyaux atomiques. Cependant, seules les réactions impliquant des noyaux situés avec le fer (Fe) dans la classification périodique des éléments sont exothermiques : c'est à dire qu'elle libèrent de l'énergie sous forme de chaleur. Au-delà de l'atome de fer, les noyaux servent pour des réactions de fission (voir Fusion/Fission, les différences) car ils sont plus lourds.

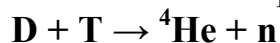
Ainsi, les réactions suivantes sont possibles :



Mais dans la pratique, les scientifiques ne sont capables que de créer des réaction de fusion avec du **deutérium et du tritium**, (4^o réaction dans la liste ci-dessus) qui sont deux isotopes de l'hydrogène (voir définition d'isotopes) : c'est la réaction qui est la plus "facile" à provoquer parmi toutes les autres. L'hydrogène est le plus léger atome existant car il ne possède qu'un électron gravitant autour d'un noyau, formé d'un proton. C'est la forme la plus simple pouvant exister ! C'est d'ailleurs l'atome le plus répandu dans l'univers (70 % de l'univers) et le premier créé lors du Big-Bang.

Pour simplifier visuellement la réaction, nous affecterons le symbole D au deutérium (au lieu de ${}^2\text{H}$) et le symbole T au tritium (au lieu de ${}^3\text{H}$).

Donc nous nous intéresserons à présent à cette réaction :



Les obstacles physiques :

A la surface de la Terre, la fusion naturelle d'atomes existe, mais elle est extrêmement faible. En effet, en moyenne, pour un atome donné, il s'écoule 8 milliards d'années entre la création de l'atome et sa fusion naturelle. Cette source d'énergie est bien évidemment inexploitable.

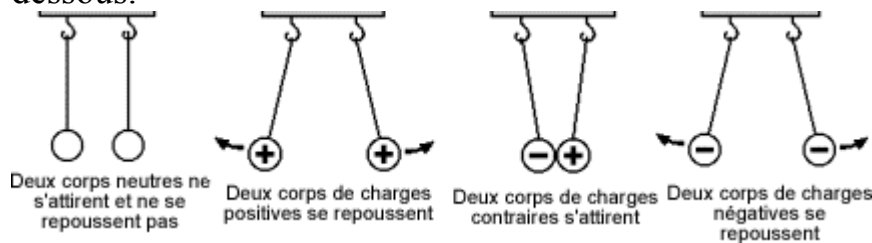
Pour la production d'électricité à grande échelle à partir de la réaction de fusion nucléaire, il faut la provoquer artificiellement. Or si elle est si improbable naturellement, c'est que les lois de la physique s'y opposent !

1° barrière : les électrons :

Les électrons, ces particules chargées négativement, tournant à une très grande vitesse autour du noyau forment une sorte de "bouclier", un obstacle à l'union des noyaux deutérium et de tritium : ils ne vont pas pouvoir se rencontrer. Pour cela, on va créer une température élevée dans le réacteur pour **former un plasma**. On parle de plasma lorsque les électrons et le noyau d'un même atome ne sont plus liés entre eux. Ainsi, chaque élément est indépendant et peut circuler librement dans tout le réacteur. Cet état de plasma (voir schéma à droite) est encore mal connu car on ne le perçoit naturellement que dans les aurores boréales et les éclairs.

2° barrière : la force électromagnétique :

A présent, il peut y avoir des collisions entre les noyaux des deux isotopes, car ils sont "vulnérables". Mais un autre hic se fait ressentir : en effet, les atomes ayant perdu leurs électrons (chargés négativement), se trouvent ainsi chargés positivement : on dit que les atomes se sont "ionisés". Or deux charges du même signe se repoussent, d'après les lois ci-dessous.



Les noyaux de deutérium et de tritium se repoussent réciproquement. Il ne peut y avoir fusion ! Les chercheurs ont donc trouvé un moyen de défier cette force magnétique. Pour comprendre comment ils y sont parvenus, nous vous proposons un petit rappel :

Les 3 interactions fondamentales : Il existe en gros 3 types d'interactions : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique, et l'interaction forte. Une interaction se produit lorsque deux corps sont soumis à des forces à distances : on dit alors qu'ils interagissent.

- l'interaction gravitationnelle régit le mouvement des planètes, des galaxies, mais aussi la pesanteur terrestre ; elle agit donc sur des longues distances. Elle n'agit pas au niveau des atomes, et ne nous intéresse donc pas ici.
- l'interaction électromagnétique assure la cohésion de la matière (elle lie noyau et électrons) et elle est à l'origine de tous les phénomènes électriques et magnétiques.
- l'interaction forte assure la stabilité des noyaux. Elle permet aux nucléons de s'attirer et ne s'exerce qu'à de très courtes distances ($D = 10^{-15} \text{ m}$).

L'**interaction forte** nous intéresse plus particulièrement dans le cas de la fusion nucléaire. En chauffant encore plus le réacteur, au moins entre 100 et 200 millions de degrés Celsius, les noyaux se rapprochent de plus en plus, toujours "torturés" par la répulsion électrostatique (= force électromagnétique) qui s'y oppose.

Mais dès que la distance entre les noyaux est inférieure à 10^{-15} m , le tour est joué !

L'interaction forte prend le relais. Et comme elle est 1000 fois plus forte que l'interaction magnétique, elle l'emporte largement sur la répulsion électrostatique : les deux noyaux fusionnent !

L'énergie dégagée :

Dans cette petite activité, nous allons étudier comment cette réaction produit de l'énergie. Nous allons donner mathématiquement un ordre de grandeur de cette énergie. Mais auparavant, quelques petits rappels s'imposent peut-être :

Le défaut de masse d'un atome :

Un atome est constitué de nucléons (protons et neutrons) et d'électrons. Or lorsqu'on mesure la masse d'un atome, on s'aperçoit qu'elle est inférieure à la somme des masses de ses nucléons et des électrons qu'il possède : étonnant !

Prenons par exemple l'atome d'Hélium ${}^4\text{He}$. Il contient : 2 protons, 2 neutrons, et 2 électrons (pour assurer la neutralité de l'atome).

Données : (source : *Manuel Physique Terminale S, collection Parisi : page 288*)

- m(e) : masse d'un électron : $9,1093897 \cdot 10^{-31}$ kg
- m(n) : masse d'un proton : $1,6726231 \cdot 10^{-27}$ kg
- m(p) : masse d'un neutron : $1,674929 \cdot 10^{-27}$ kg

Calculons la somme des éléments séparés de l'atome :

$$2m(p) + 2m(n) + 2m(e) = 6,69692607794 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Or lorsqu'on mesure la masse d'un atome d'Hélium, on obtient :

$$m(\text{hélium}) = 6,64472 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

Le **défaut de masse noté Δm d'un atome est la différence entre la somme des masses des nucléons séparés** (on néglige les électrons car leur masse n'est rien comparée à la masse des nucléons...), **et la masse du noyau.**

Pour notre exemple :

$$\begin{aligned} \Delta m &= [2m(p) + 2m(n)] - m(\text{hélium}) \\ &= 6,69692607794 \cdot 10^{-27} - 6,64472 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\Delta m = 5,220607794 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Par définition, le défaut de masse est toujours positif (car "la masse des nucléons séparés est supérieure à la masse de l'atome").

Défaut de masse d'une réaction nucléaire :

Dans une réaction nucléaire (qui affecte le noyau des atomes mis en jeu), il y a modification des particules de certains noyaux atomiques. Donc, le phénomène de Défaut de masse de l'atome va s'appliquer. Malgré le même nombre de particules au départ et à la fin de la réaction, la somme des masses des réactifs est différente de la somme des masses des produits.

Considérons la réaction de fusion la plus courante : $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$
(D = deutérium ; T = tritium ; He = hélium ; n = neutron).

Données :

$$m(D) = 2,01355 \text{ u}$$

$$m(T) = 3,01550 \text{ u}$$

$$m(\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$$

$$m(n) = 1,00866 \text{ u}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{conversion : } 1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$m(\text{réactifs}) = m(D) + m(T) = 2,01355 + 3,01550 = 5,02905 \text{ u}$$

$$m(\text{produits}) = m(\text{He}) + m(n) = 4,00150 + 1,00866 = 5,01016 \text{ u}$$

La perte de masse au cours de la réaction, Δm , est donc :

$$\Delta m = m(\text{réactifs}) - m(\text{produits}) = 5,02905 - 5,01016$$

$$\Delta m = \mathbf{0,01889 \text{ u}}$$

Pour cette réaction de fusion, la masse des réactifs est supérieure à la masse des produits : deux petits noyaux sont plus lourds que leur noyau fusionné.

Relation entre masse et énergie :

Einstein, dans sa théorie de la relativité générale a mis en évidence une relation, devenue célèbre :

$E = m \cdot c^2$ (E = énergie du système ; m = masse du système ; c = célérité de la lumière dans le vide)

Energie libérée par la réaction :

L'énergie libérée, notée Q , par la réaction, est égale au produit de la perte de masse par c^2 : $Q = \Delta m \cdot c^2$.

Donc pour notre réaction de fusion, l'énergie libérée est : $Q = (0,01889 \times 1,6605 \cdot 10^{-27}) \times (2,99792458 \cdot 10^8)^2$

$$\mathbf{Q = 2,81911143844 \cdot 10^{-12} \text{ J}}$$

(comme $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$:

$$Q = 2,81911143844 \cdot 10^{-12} / 1,60 \cdot 10^{-19} \quad Q = 1,76194464902 \cdot 10^7 \text{ eV} = 17,60 \text{ MeV} :$$

l'électron-volt (eV) est une autre unité d'énergie, plus adaptée aux noyaux)

Là, nous venons de calculer l'énergie produite par 1 seul atome au cours de la fusion. Maintenant, calculons l'énergie produite par la fusion d'un kilogramme de deutérium.

Energie produite par la fusion d'un kilogramme de deutérium :

Dans 1 Kg de deutérium de masse molaire $2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, il y a N noyaux, soit environ $N = N_A \times (1000 / 2)$;

N_A est le nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (programme de seconde générale)

$$\mathbf{N = 3,01 \cdot 10^{26} \text{ noyaux !}}$$

Calculons à présent l'énergie E que libère cette réaction :

$$E = Q \times N = 2,81911143844 \cdot 10^{-12} \times 3,01 \cdot 10^{26}$$

$$E = 8,5 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

Inutile de vous le dire : c'est une **énergie considérable qui est dégagée par la fusion !**

C'est cette énergie est communiquée sous forme d'énergie cinétique au noyau d'hélium et au neutron formés.

Schéma

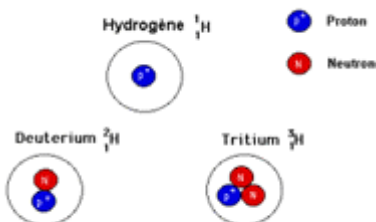
Tableau périodique des éléments montrant les groupes principaux et les lanthanides/actinides.

Tableau périodique des éléments

Définition

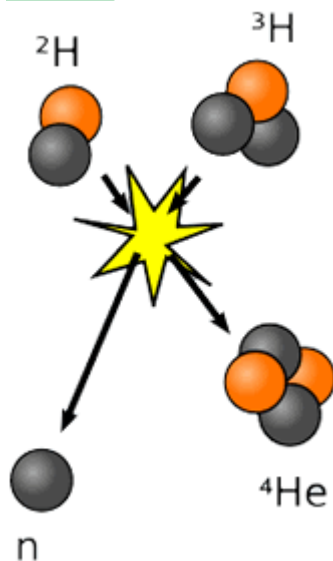
Isotope : un isotope d'un atome quelconque est un atome à qui on a ajouté ou retiré un ou plusieurs neutrons (une des différentes particules du noyau). Comme les neutrons sont neutres, cela ne change rien au reste de l'atome : l'équilibre des charges est donc préservé. Seul le poids change.

Schéma



De l'hydrogène au deutérium et au tritium

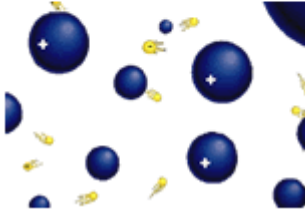
Schéma



Réaction de fusion nucléaire

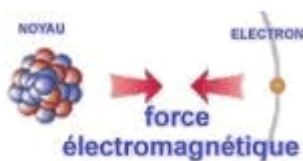
Le saviez-vous ?

La matière ne comporte pas 3 états, comme on vous l'a sans doute appris à l'école (solide, liquide, gaz), mais 4, voire même plus. Ce mystérieux 4^e état est le plasma. Dans cet état, le noyau et les électrons qui constituent les atomes sont séparés. Il peut être atteint à condition d'obtenir de très hautes températures, voisines de celles qui règnent dans le soleil (de l'ordre de 15 millions de degrés).



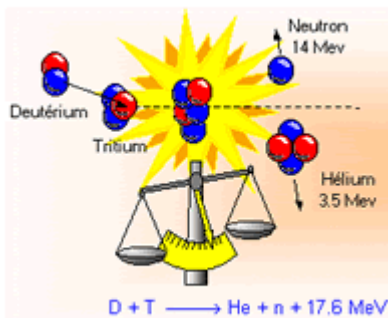
(Représentation atomique du plasma)

Schéma



L'interaction électromagnétique

Schéma



Perte de masse de la réaction

>>> Fusion froide : mythe ou réalité ? <<<

Les débuts de la fusion froide :

La fusion froide a démarré en 1989 avec les expériences de Pons et Fleischmann. Aujourd'hui, il existe une dizaine de méthodes différentes pour arriver à la fusion froide.



Pons et Fleischmann

Définition de la fusion :

Comme pour la fusion thermonucléaire ("chaude"), il faut parvenir à se faire "coller" deux noyaux d'atomes. De l'énergie se dégage alors et peut être utilisée pour différentes choses, comme la production d'énergie, l'explosion de bombes,... Ces noyaux étant tout deux de charges positives, ils se repoussent naturellement. Il faut donc les forcer à fusionner.

Principe :

Pour forcer les noyaux à fusionner, on remplit un matériau solide (le palladium) avec du deutérium, un isotope de l'hydrogène. On arrive à en mettre tellement que finalement, la fusion se réalise : les atomes sont complètement compressés les uns sur les autres ; tellement, qu'ils finissent par se coller entre eux. Un dégagement d'énergie sous forme de chaleur se produit.

Pourquoi dit-on fusion "froide" ?

On appelle cette méthode fusion froide car elle peut avoir lieu à des températures avoisinant les 100° C, ce qui n'est rien par rapport aux millions de degrés qu'il faut atteindre dans les réacteurs de type tokamaks. Cette réaction de fusion est donc dite relativement "froide".

Ambiguïté qui remet tout en cause...

Les travaux et les expériences d'expérimentation de la fusion froide consistent surtout à mesurer la chaleur émise, qui est en relation directe avec l'énergie produite par la réaction. C'est là où le problème se pose : souvent, les réactions émettent très peu de chaleur qui est donc difficilement détectable. Mais comment être

sûr à 100 % que cette chaleur infime est bien le résultat de la réaction de fusion ? De plus, ces résultats ne sont pas reproductibles à coup sûr, c'est à dire qu'un jour ça peut marcher parfaitement, et d'autres pas. C'est très instable.

C'est pour ces raisons que de nombreux scientifiques doutent et qualifient la fusion d'erreur scientifique. En effet, elle défie complètement les lois de la physique actuelle.

Enjeux phénoménaux :

Non, ce terme n'est pas exagéré. Restons optimistes, tout de même, sait-on jamais... Imaginez-vous : si on arrivait à maîtriser la fusion froide, on modifierait complètement les paramètres géopolitiques de la planète entière. On pourrait avoir de l'énergie en quantité illimitée, n'importe où sur Terre.

=+++++++ <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/>

> Les fiches techniques > Hydrogène et piles à combustibles

■ Principe de fonctionnement :

On distingue deux types de propulsions utilisant l'hydrogène : la propulsion par des piles à combustibles et le moteur à combustion à hydrogène.

Le premier utilise l'hydrogène pour faire fonctionner une ou plusieurs piles à combustibles qui produisent l'électricité nécessaire pour faire tourner le moteur électrique. L'hydrogène est alors qualifié de "vecteur d'énergie" et non pas de carburant.

Le deuxième type de propulsion fonctionne sensiblement pareil qu'un moteur à essence conventionnel : l'oxygène (qui peut être stocké sous forme liquide) est injecté sous forme gazeuse à haute pression (de 80 à 120 bars) directement dans la chambre à combustion du moteur. Il y est mélangé avec de l'oxygène est brûlé afin de fournir la force motrice nécessaire à la propulsion du véhicule.

■ Avantages et inconvénients

- Quasi-absence de pollution sonore pour la propulsion par pile à combustible (la pile n'émet aucun bruit, le moteur électrique est infiniment moins bruyant qu'un moteur classique et ne tourne pas à l'arrêt)
- Absence totale de tous gaz d'échappement et d'émissions toxiques
- Abondance de l'hydrogène dans les hydrocarbures, dans l'eau et dans tout ce qui est vivant

- Dangerosité de l'hydrogène : c'est un gaz inflammable et détonnant
- Pertes énergétiques et émissions liées à la préparation et à la fabrication des piles à combustible
- Coût actuel très élevé et rendement énergétique médiocre de l'électrolyse de l'eau, principale voie de production de l'hydrogène à partir de composants non fossiles.

■ Etude de cas : L'Allemagne

D'après une analyse effectuée par un groupe de travail sur la stratégie énergétique des transports - regroupant des instances fédérales, des groupes pétroliers et des constructeurs automobiles * - sur 10 carburants alternatifs, l'hydrogène est celui qui a le plus fort potentiel à long terme. A ce titre, les Etats-Unis misent fortement sur ce secteur, ils travaillent au développement de la "freedom car" (visant à l'indépendance vis-à-vis du pétrole).

Par contre, il ne semble pas réaliste de développer, à court terme, la pile à combustible ou la propulsion à hydrogène. Le coût de production de l'hydrogène est dix fois plus important que celui des carburants conventionnels. Concernant son transport, les coûts sont vingt fois supérieurs pour l'hydrogène à haute pression et cinq fois pour l'hydrogène liquide.

Au terme des études menées par l'Office fédéral de l'environnement (UBA) à l'aide de modèles intégrant des paramètres tant écologiques, sociaux et économiques, il s'avèrerait que l'utilisation de la pile à combustible et plus généralement de l'hydrogène dans les transports est un mauvais choix. Les véhicules utilisant une pile à hydrogène ne réduisent pas les émissions de gazs nocifs et représentent un gaspillage de ressources précieuses.

■ Rec herche et développement

Du côté des constructeurs, l'analyse diffère selon la technologie envisagée.

pour BMW, la pile à combustible n'est pas, à l'heure actuelle, un domaine jugé porteur commercialement. Cette technologie n'interviendrait que dans la production auxiliaire d'électricité.

L'entreprise DaimlerChrysler (DC) entreprend quant à elle de développer des véhicules prototypes propulsés par des piles à combustible. DC est avec Toyota et general motors le plus grand constructeur de véhicules avec piles à combustible au monde. Ceux ci atteignent aujourd'hui un degré d'efficacité supérieur à 37%, l'objectif étant d'atteindre 45%.

A l'inverse, le moteur à combustion à hydrogène semble intéresser davantage les constructeurs. Certains entreprennent de développer, à brève échéance, des projets commerciaux de véhicules à hydrogène.

* Total, Shell, RWE, Opel, Man, VW, DaimlerChrysler, BP, BMW group, Aral et BMU/BMWA/BMVEL



300 km/h

Aux débuts de l'automobile, la course à la vitesse passionnait les foules. Forcément, quand la norme était le galop du cheval, qu'une automobile puisse avancer 2 ou 3 fois plus rapidement faisait sensation. Mais c'était au XIX^e siècle. En 1899

déjà, une voiture franchit la barre des 100 km/h (une voiture électrique, la *Jamais Contente* aux mains du belge Camille Jenatzy). A peine 10 ans plus tard, le français Victor Héméry passait le cap des 200 km/h, et une génération après, le britannique Malcolm Campbell roulait à plus de 400 km/h, c'était en 1932. Mais depuis lors, les records de vitesse terrestres ont perdu de leur attrait.

Un changement d'énergie peut pourtant leur rendre de leur éclat. Bertone avait passé le cap des 300 km/h avec une voiture électrique en 1995, et en septembre 2004, c'est au tour de BMW d'établir un nouveau record, avec le carburant du futur : l'hydrogène. 300 km/h dans une voiture à hydrogène, c'est le prototype H2R.



H2R signifie 3 choses : H 2 Race Car, Hydrogen Record Car et aussi Hydrogen Research Car. Il s'agit d'un prototype unique qui a été développé en 10 mois. Mais s'il s'agit d'une voiture 100 % allemande, la France peut s'enorgueillir que les records de vitesse du H2R aient été réalisés sur son sol. C'est en effet à Miramas, à côté de Marseille, sur le circuit où BMW teste régulièrement ses V10 de F1, que le H2R a franchi le cap des 300 km/h.



C'est même plusieurs records qui ont été battus. Record du kilomètre départ lancé (11,993 s, soit 300,190 km/h), record du 1/4 de mile (400 m) départ arrêté (14,933 s.), record du kilomètre départ arrêté (26,557 s), 9 records ont été battus en tout, même s'ils n'étaient pas trop

difficiles à établir, puisque personne avant BMW n'avait cherché sérieusement à rouler vite au volant d'une voiture fonctionnant à l'hydrogène. Cela deviendra difficile maintenant, d'autant plus que selon nous, d'autres records vont suivre. Il y a en effet quelque chose qui choque dans ce prototype H2R, et tous les visiteurs du salon de Paris ne manqueront pas de le remarquer : il est énorme !

Certes, il est vrai que pour des raisons de coût, comme de rapidité de réalisation, le H2R emprunte le cadre autoporteur, et les trains roulants d'une BMW de série. Et on ne peut nier que son moteur, une version spéciale du V12 de la 760i, soit un gros bloc, ou que son réservoir d'hydrogène



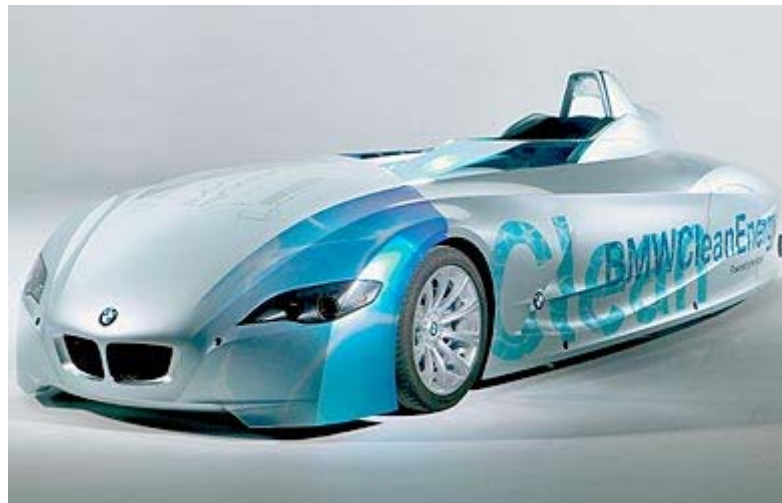
soit volumineux. Mais par rapport à une BMW série 7, déjà une grosse voiture, le H2R est 40 cm plus long, et 10 cm plus large ! Alors que pour simplement aller vite, l'idéal aurait été de réduire la surface frontale, en faisant l'auto la plus étroite possible... La vision du châssis (on voit ci-dessus, que certains tests ont été réalisés sans carrosserie) est ensuite très instructive. C'est très éloigné d'une coque en carbone, et ce l'est presque tout autant des treillis en tube carré des sportives classiques. Les voitures qui courent aux 24 Heures du Mans, ne sont pas du tout ainsi, ce qui amène à penser qu'en dépit d'une masse conséquente (1450 kg à vide), cet H2R a été conçu pour rouler à bien plus de 300 km/h.



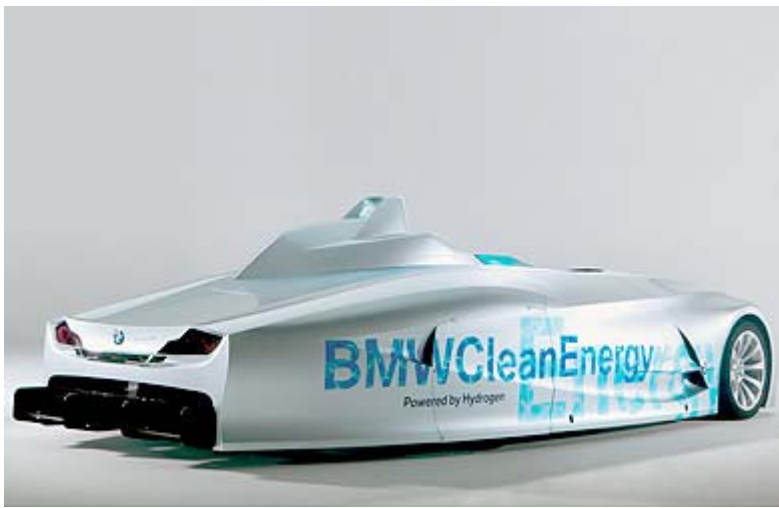
Un point commun avec les voitures de course cependant, mis à part le fait d'être une monoplace, c'est la carrosserie. Comme sur une Formule 1, elle est réalisée en matière synthétique renforcée de fibres de carbone. La photo ci-dessus le montre bien, ayant été prise avant que la voiture

ne soit peinte. Quant à ce qui fait la spécificité du H2R, c'est son fonctionnement à l'hydrogène. Le plein se fait à l'hydrogène liquide (on voit ci-contre un ingénieur le faire), ce n'est pas plus long que pour faire un plein d'essence, la différence étant que tout se fait sous pression, et avec un tuyau (le mot est faible) aux qualités très particulières, puisqu'on rappelle que l'hydrogène n'est liquide qu'à -253° ... Le réservoir du H2R en contient 11 litres.

Comme d'habitude avec BMW, l'hydrogène provient de chez [Linde](#), qui a installé une station mobile de ravitaillement en hydrogène dans les stands. C'était la première fois qu'une station distribuait de l'hydrogène dans les Bouches du Rhône, mais ce ne sera assurément pas la dernière ! Quant à



exploiter cet hydrogène pour faire rouler le H2R à plus de 300 km/h, il a fallu pour cela tout le talent de BMW. En théorie, n'importe quel moteur à combustion interne peut fonctionner à l'hydrogène, mais dans la pratique, avec une densité très différente de celle d'un hydrocarbure comme l'essence, avec une plus grande facilité à s'enflammer, mais aussi un temps de combustion plus court, il est très complexe de convertir un moteur à essence à l'hydrogène.



Mais c'est pourtant ce que les ingénieurs allemands ont fait, et le plus étonnant est que ce moteur soit très proche du V12 de série de la 760i. Le secret, c'est le *Valvetronic*, le système de distribution entièrement variable de BMW (en série sur ses modèles les plus puissants), qui sans

modification matérielle est capable de changer radicalement le fonctionnement du moteur pour l'adapter au carburant hydrogène. D'autres modifications ont bien sûr été nécessaires, comme par exemple des sièges de soupapes en un matériau plus résistant. Cela est dû au fait que l'hydrogène ne possède pas l'effet lubrifiant du mélange air-essence (effet lubrifiant qui avait déjà été largement atténué par la suppression du plomb dans la carburant).

Des petites choses, mais aussi une grosse, au niveau du système d'alimentation. Pour ce faire, BMW a inventé un nouveau type d'injecteur, que le constructeur appelle « *insuffleur* ». Par rapport à l'injection directe de la 760i à essence, c'est plus proche d'un système d'injection indirecte,



mais ce qui les distingue plus que tout, c'est leur taille. Car même s'il aurait été possible d'utiliser des injecteurs de petite taille, en faisant le choix d'une très haute pression d'injection, comme on fait maintenant sur les diesels, les ingénieurs ont fait le choix d'injecteurs basse pression, et vu que l'hydrogène présente un volume supérieur à l'essence (par unité énergétique), les insuffleurs sont conséquemment plus volumineux que des injecteurs d'essence.



Et dernière différence significative par rapport à l'essence, elle est dans la capacité à un mélange air-hydrogène à s'enflammer même si la proportion d'hydrogène est très faible. Le moteur peut donc fonctionner en mélange pauvre, ce qui sous-entend une gestion électronique ultra-sophistiquée pour

permettre l'insufflation d'hydrogène à des pressions très variables, et en des temps d'injection eux aussi très variables. Ce n'est pas pour rien que BMW travaille sur l'hydrogène depuis plus de 30 ans ! Mais qu'on ne croit pas que le fruit de ce travail ne sert qu'à battre des records. Une BMW de série à hydrogène, est pour bientôt.

Ce sera le modèle le plus haut de gamme de BMW : une 760i bicarburant (photos du prototype ci-dessus et ci-contre), elle pourra rouler aussi bien à l'essence qu'à l'hydrogène, et sera commercialisée entre 2005 et 2008 (après le restyling de la série 7, qui sera présenté en mars



prochain). Cette voiture devrait avoir une puissance de quelques 170 kW, ce qui est peu pour une cylindrée de 6 litres, mais cette puissance sera la même quelque soit le carburant utilisé, le conducteur étant bien évidemment appelé à rouler le plus souvent possible à l'hydrogène (un bouton au tableau de bord permet de passer de l'un à l'autre), la solution de la bivalence ayant été choisie faute à l'absence d'un réseau de distribution d'hydrogène...

Mais à terme, quand apparaîtront les moteurs conçus dès la départ pour l'hydrogène, et qui ne pourront plus fonctionner à l'essence, les puissances obtenues seront bien supérieures, et avec des rendements que même la pile à combustible peut craindre. Voilà l'hydrogène, et c'est ce dont le Dr Helmut Panke, président de BMW, s'est entretenu avec le Président Chirac lors de sa visite officielle du salon de l'auto de Paris.

Diesel ou essence, c'était le débat du siècle dernier, celui de ce siècle est pile à combustible ou moteur à combustion interne. Car même le grand atout de la pile à combustible, soit de ne générer que de la vapeur d'eau, ne tient plus. Le moteur à combustion de BMW est en effet si raffiné qu'il brûle son hydrogène à des températures où la formation de NOx ne se produit pas ! C'est là la seule pollution possible d'un moteur thermique fonctionnant à l'hydrogène, mais BMW est parvenu à l'esquiver. Voilà qui confirme une fois de plus que l'hydrogène est le carburant de demain.

Alors vivement demain, et merci à BMW de faire tout ce qu'il peut pour hâter les choses, puissent les autres constructeurs suivre cet élan.

Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?

DUFOIX Mathieu - MASTRANGELO Jean-François - VALMAGE François

08 Mars 2004

Sommaire

Sommaire

Introduction

1 La production d'hydrogène

1.1 Les technologies thermochimiques de production

1.1.1 Le vaporeformage du gaz naturel

1.1.2 L'oxydation partielle

1.1.3 Le reformage autotherme

1.1.4 La gazéification du charbon

1.1.5 La gazéification et la pyrolyse de la biomasse

1.2 La décarbonisation et la séquestration du CO₂

1.3 La production à partir du nucléaire

1.4 La production par électrolyse

1.5 Les procédés photolytiques

1.5.1 Le procédé photobiologique

1.5.2 La photoélectrolyse

2 Le stockage et la distribution de l'hydrogène

- 2.1 Le conditionnement physique et chimique
 - 2.1.1 La purification
 - 2.1.2 La liquéfaction (LH2)
 - 2.1.3 La compression (CGH2 compressed gas hydrogen)
- 2.2 Le stockage
 - 2.2.1 Le stockage classique
 - 2.2.2 Les matériaux poreux
 - 2.2.3 Les hydrures métalliques
 - 2.2.4 Un champ de recherche : le stockage haute pression dans des « microsphères »
- 2.3 Le transport de l'hydrogène
- 2.4 L'approvisionnement du client
 - 2.4.1 L'approvisionnement pour le transport
 - 2.4.2 L'approvisionnement dans les autres secteurs que le transport
- 2.5 Le bilan énergétique de la distribution
- 3 Les Applications de l'hydrogène
 - 3.1 La Pile à Combustible
 - 3.1.1 Le fonctionnement de la PAC
 - 3.1.2 Le rendement de la PAC
 - 3.2 Les différentes utilisations
 - 3.2.1 Le mobile
 - 3.2.2 Le stationnaire
 - 3.2.3 Le portable
- 4 Les filières de l'hydrogène
 - 4.1 L'Analyse du Cycle de Vie
 - 4.1.1 Le principe général du LCA
 - 4.1.2 La méthodologie et la nomenclature
 - 4.2 L'exemple du transport : l'hypothèse optimiste

- 4.2.1 Les caractéristiques des véhicules
- 4.2.2 Les pertes d'énergie : Energy use
- 4.2.3 Les émissions de gaz à effet de serre : GHG Emissions
- 4.2.4 Conclusion de l'hypothèse optimiste
- 4.3 L'exemple du transport : la problématique du coût
 - 4.3.1 Le coût du « Puits au Réservoir »
 - 4.3.2 La consommation du véhicule
 - 4.3.3 Les leviers évoqués
- 4.4 L'exemple du transport : l'hypothèse pessimiste
 - 4.4.1 L'Analyse du Cycle de Vie de l'IFP
 - 4.4.2 Les leviers évoqués les plus récents
- 5 Les technologies critiques et la dynamique d'émergence de l'hydrogène
 - 5.1 L'analyse de court terme (2010)
 - 5.2 L'analyse de moyen terme (2020)
 - 5.3 L'analyse de long terme (après 2020)

Conclusion

Bibliographie

Liens Internet

Introduction

L'hydrogène, si on peut dire, déchaîne les passions tant du côté des scientifiques que du côté des industriels. Certains voient, en effet, en lui la solution ultime pour tous les problèmes environnementaux et énergétiques à venir, tandis que d'autres estiment qu'il ne s'agit que d'une vaine espérance, les retombées probables ne pouvant intervenir que dans minimum un siècle.[\[1\]](#)

Pour y voir plus clair sur ce sujet, il est à noter que l'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire, comme l'est par exemple l'électricité. Il est donc nécessaire de posséder des technologies capables de le produire. Il en existe plusieurs, existantes et en cours de recherche, comme celles basées sur les combustibles fossiles, le nucléaire ou encore

les énergies renouvelables. Ensuite, vient le stockage et le transport, et enfin l'utilisation finale. Cette dernière peut concerner tant le transport de toute sorte, que les besoins domestiques en chaleur et en électricité. Ainsi, certains parlent à ce sujet d'une éventuelle « civilisation de l'hydrogène ». En outre, le stockage, le transport et l'utilisation terminale de l'hydrogène se font toujours sans émissions de gaz à effet de serre.

On comprend donc pourquoi l'hydrogène a le vent en poupe du côté des filières nucléaires et renouvelables qui permettent une production sans émissions. Elles pourraient en effet ne plus se cantonner au marché de l'électricité mais toucher par exemple le marché automobile. Ceci serait également le cas pour la filière charbonnière, même si celle-ci est productrice de dioxyde de carbone dans son procédé de production d'hydrogène : la production de CO₂ serait centralisée au niveau de la production et des mécanismes de séquestration pourraient être mis en œuvre. Quant aux lobbies pétroliers et aux constructeurs automobiles, ils sont, bien entendu, dubitatifs envers ce possible remplaçant de la filière classique du transport routier.

Nous avons donc essayé, au travers de ce rapport, de synthétiser à tous les stades de la filière tant les certitudes et doutes technologiques que les perspectives économiques. Ainsi, la question de la production de l'hydrogène sera tout d'abord présentée, viendront ensuite le problème du stockage et du transport, et celui de l'utilisation finale. Enfin, les deux dernières parties aborderont successivement l'analyse du cycle de vie et la dynamique d'émergence de la filière hydrogène.

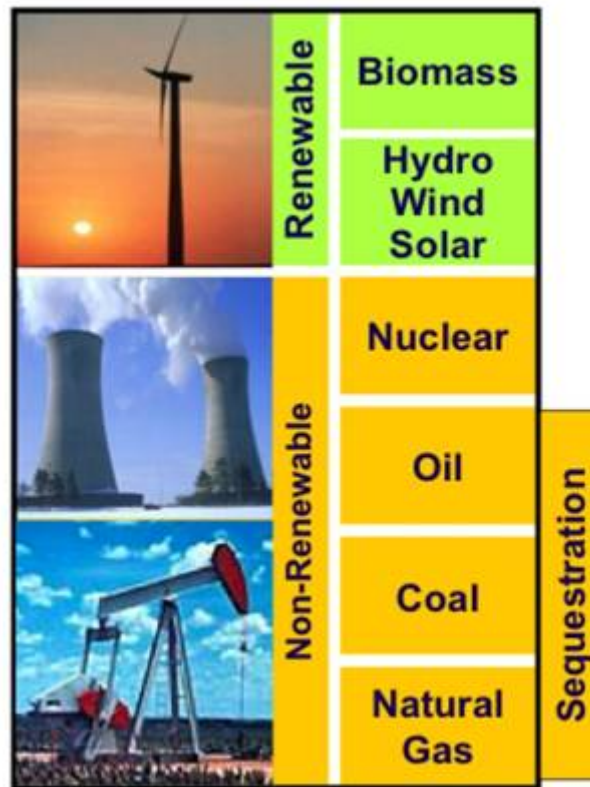
1 La production d'hydrogène

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée de l'hydrogène. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante. Ces processus peuvent être séparés en quatre groupes de technologies :

- les technologies thermochimiques ;
- les technologies nucléaires ;
- les technologies électrolytiques ;
- les technologies photolytiques.

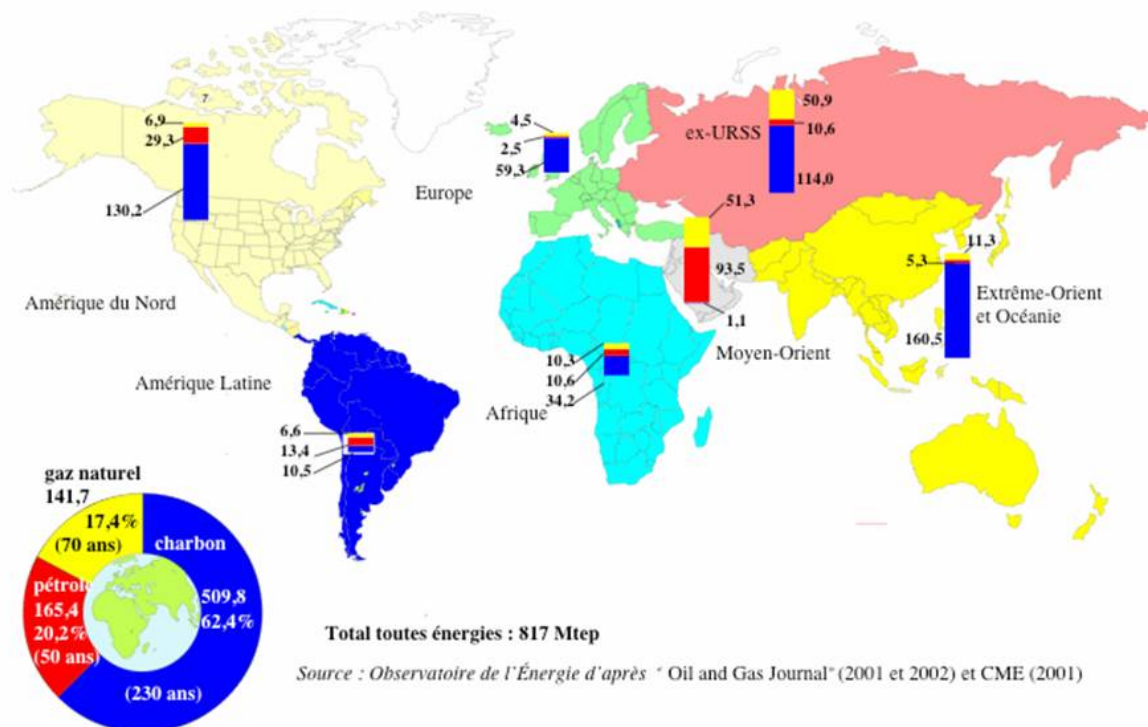
Toutes les ressources d'énergies, renouvelables et non-renouvelables, sont envisagées pour permettre la production d'hydrogène, qui doit à terme permettre la satisfaction de la demande en énergie sans peser sur le futur environnemental de notre planète. Les sous-parties qui

suivent étudient les différentes techniques de production énoncées, la seconde sous-partie présentant particulièrement la décarbonisation et la séquestration du dioxyde de carbone.



Réserves énergétiques mondiales (1^{er} janvier 2003)

Unité : Milliard de tep



1.1 Les technologies thermochimiques de production

La production d'hydrogène à partir de carburants fossiles est aujourd'hui la plus répandue, mais elle ne pourrait constituer une solution à long terme au vu de la durée de vie limitée de ces carburants (cf. schéma précédent). Elle pourrait donc seulement constituer une solution à moyen terme. De plus cette technique génère du CO₂. Actuellement, 48% de l'hydrogène mondiale est produit à partir du gaz naturel, 30% du pétrole (la plupart du temps consommée dans les raffineries), 18% du charbon, et le 4% restant provient de l'électrolyse de l'eau. [2]

On distingue cinq processus au sein des technologies thermochimiques de production : le vaporeformage du gaz naturel, l'oxydation partielle, le reformage autotherme, la gazéification du charbon et le reformage de la biomasse.

1.1.1 Le vaporeformage du gaz naturel

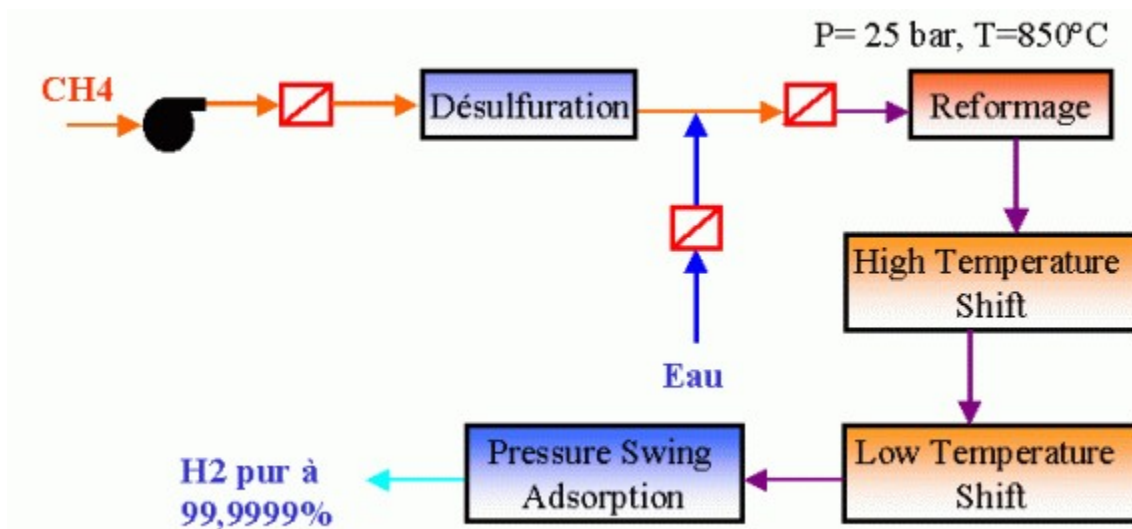
Le gaz naturel contient en majorité du méthane, mais contient aussi du CO₂ et du soufre. Ce dernier doit être d'abord éliminé avec la désulfuration. Le procédé de vaporeformage se sépare alors en deux réactions : la première est la réaction du méthane avec l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de Water Gas Shift entre l'eau et le CO qui produit du CO₂ et du H₂.

Principe du vaporeformage

La première réaction du reformage a lieu vers 800-900°C pour une pression de 25 bars, celle-ci donne un gaz riche en CO et en H₂ contenant aussi du CO₂.

Il faut ensuite éliminer le CO, pour cela on utilise les réactions de High Temperature et de Low Temperature Shift vers 400 et 200°C. On obtient alors un gaz avec essentiellement H₂, CO₂, H₂O, un peu de CO et du CH₄.

Cette étape est suivie d'une dernière purification du gaz : la Pressure Swing Adsorption (PSA) permet d'obtenir de l'hydrogène pur à 99,999%. On peut également purifier le mélange avec des procédés cryogéniques, soit par refroidissement dans des échangeurs, ce qui permet d'obtenir H₂ avec 2 à 5 % de CO, soit par méthanation. Dans ce dernier cas, on élimine d'abord une grande partie du CO₂ en le faisant réagir avec une solution d'hydroxyde de Sodium (NaOH) : le CO₂ se dissout alors sous forme d'ions carbonates. Le CO et le CO₂ restant réagissent ensuite avec H₂ en formant du méthane.



Ces procédés sont aujourd'hui bien maîtrisés, des unités produisant de 20 à 100.000 m³/h existant déjà. Question prix, tout dépend de celui du gaz naturel et des coûts d'investissement. Pour les petites installations, les coûts les plus importants seront les coûts d'investissement, et pour les grosses installations, il s'agira du coût de la matière première. Enfin, d'après le site de l'EERE en 2003, le coût de ce procédé pourrait à terme baisser de 25 à 30%.

1.1.2 L'oxydation partielle

L'oxydation partielle est également un processus de production maîtrisé, il s'agit de la réaction entre un carburant (gaz naturel, hydrocarbures légers, voire le charbon) et de l'oxygène. Suite à la présence de monoxyde de carbone, celle-ci est suivie d'une purification du gaz. De plus, à l'image du processus de production précédent, on assiste au départ à une purification du carburant qui contient à la base du soufre, du CO₂ et du CO.

Enfin, les scientifiques développent actuellement un réacteur à membrane en céramique qui permettrait la séparation simultanée de l'oxygène de l'air et des produits de l'oxydation partielle des matières possibles. S'il est réussi, ce processus pourrait avoir comme conséquence la production améliorée de l'hydrogène comparativement aux unités conventionnelles de reformage.[\[3\]](#)

1.1.3 Le reformage autotherme

Le reformage autotherme est une combinaison de l'oxydation partielle et du vaporeformage, le carburant étant mélangé avec de l'air et de l'eau. L'oxydation partielle étant exothermique, il y a dégagement de chaleur qui est utilisée ensuite par le vaporeformage, réaction endothermique. Au final, il n'y a pas besoin d'apporter de chaleur. S'en suit également une purification par les réactions de Water Gas Shift. On atteint une très bonne efficacité et plusieurs carburants peuvent être utilisés : le gaz naturel, le méthanol ou des hydrocarbures.

1.1.4 La gazéification du charbon [\[4\]](#)

Cette technique fut la source principale de production d'hydrogène avant le reformage, mais elle n'est aujourd'hui plus qu'utilisée en Afrique du Sud et en Chine. Elle n'est en effet intéressante que lorsque les prix du pétrole et du gaz sont trop élevés. Cependant, progressivement ce processus de production révèle de l'importance : il y a co-production d'électricité, d'hydrogène et de carburants liquides. Concernant le principe, il y a mélange du charbon avec de l'eau et de l'air à 1000°C et sous haute pression, ce qui permet d'obtenir un gaz contenant en majorité du CO et de l'hydrogène. L'élimination du monoxyde de carbone se fait grâce à la réaction de Water Gas Shift, le CO₂ formé étant ensuite dissous.

1.1.5 La gazéification et la pyrolyse de la biomasse

Des recherches sont entreprises actuellement par le département américain de l'énergie pour tenter de produire de l'hydrogène via de la biomasse en utilisant des procédés de gazéification et de pyrolyse.[\[5\]](#)



Les techniques de traitement de la matière végétale sont semblables à celles qui sont utilisées pour les combustibles fossiles. En utilisant les résidus et les pertes agricoles, ou la biomasse spécifiquement développée pour des usages d'énergie, de l'hydrogène peut être produit par l'intermédiaire de la pyrolyse ou de la gazéification.

La pyrolyse de la biomasse produit un produit liquide appelé bio-huile, qui, comme le pétrole, contient une gamme étendue de composants qui peuvent être séparés pour donner des produits chimiques et des carburants utilisables.

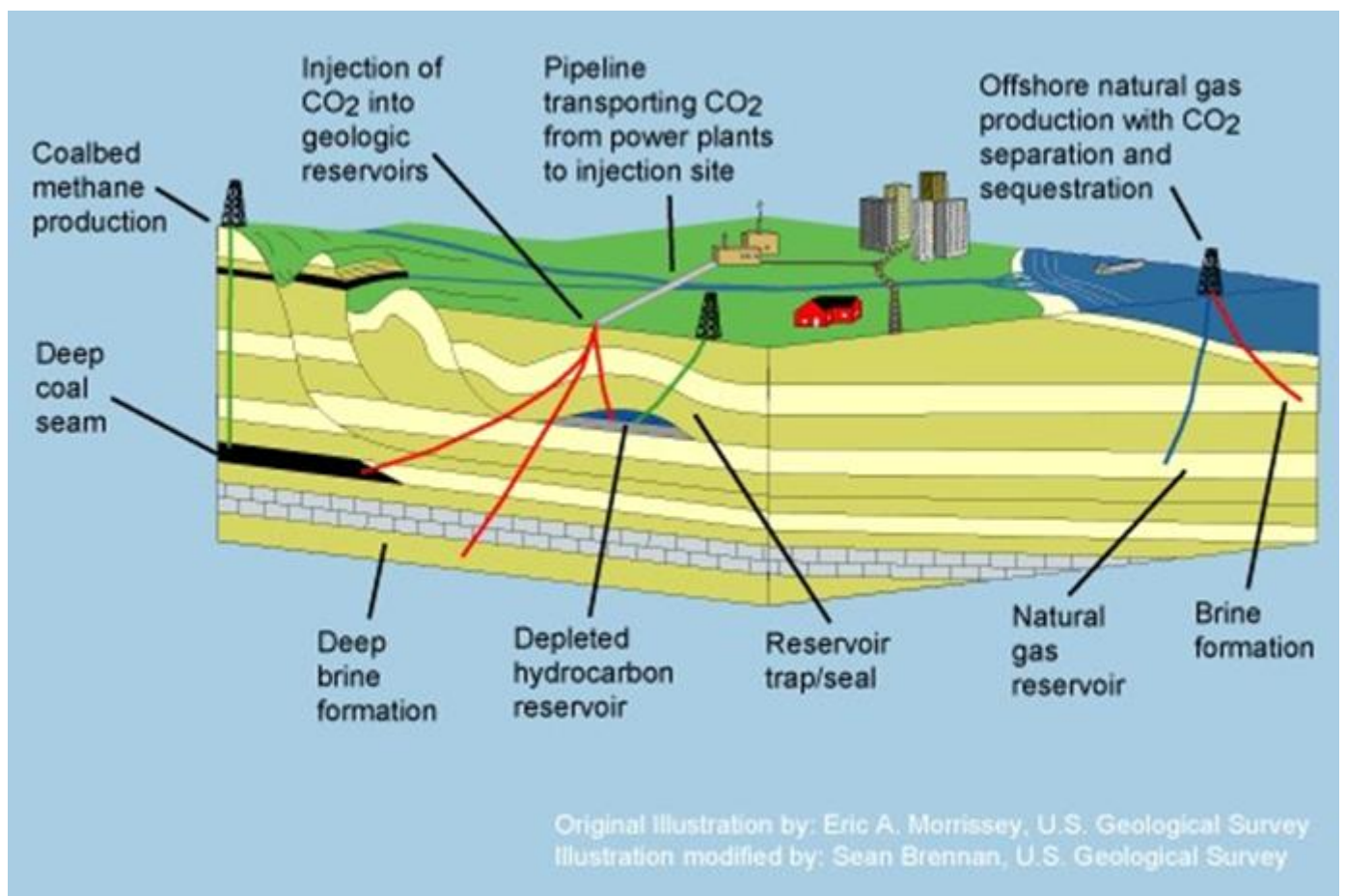
Cependant, à la différence du pétrole, la bio-huile contient un nombre significatif de composants oxygénés fortement réactifs dérivés principalement des hydrates de carbone et de la lignine. Ces composants peuvent être transformés en produits, y compris l'hydrogène. Ces stratégies de coproduction sont conçues pour produire simultanément des produits

chimiques à forte valeur, comme les résines phénoliques, et de l'hydrogène. Enfin, il est important de noter que tout ceci n'est encore qu'à l'état de recherche.

1.2 La décarbonisation et la séquestration du CO2 [6]

La présentation précédente de la production d'hydrogène à partir de matières fossiles a montré la nécessité d'un besoin en énergie. Les rendements d'efficacité sont environ de 72% à partir du gaz, 76% à partir du pétrole, et de 60% à partir du charbon. Cependant, par unité de chaleur produite, plus de CO2 est produit en faisant de l'hydrogène à partir de combustible fossile qu'en brûlant le combustible fossile directement.

Ainsi, la décarbonisation seule des carburants n'atténuera pas l'augmentation de rejet de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Une possibilité de matières fossiles « propres » résiderait dans la capture et la séquestration du CO2. Les réservoirs de séquestration incluent les océans, la flore, les sols, les gisements épuisés de gaz naturel et de pétrole, les couches aquifères salines profondes, les filons houillers et les carbonates minéraux solides. De plus, l'avantage principal de la séquestration est sa compatibilité avec les infrastructures existantes de gisement de combustible fossile.



La séquestration par la flore et par les sols n'exige pas la localisation d'unités de production ou plus de carburant, mais la capacité naturelle d'absorber le CO₂ est limitée. La prise de CO₂ se produit pendant la croissance de la matière organique, lorsque la réaction nette de photosynthèse-respiration est vers la droite : $hv + CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O + O_2$. Les données historiques de CO₂ et les modèles impliquent une absorption de carbone par la forêt aujourd'hui de 1 à 3 milliards de tonnes (GtC) par année, mais certains modèles montrent un renversement « from sinks to sources » à long terme lorsque le réchauffement planétaire augmentera la respiration des sols. Les approches biologiques de séquestration à plus long terme incluent l'enterrement des arbres pourris sous terre et l'enfouissement des résidus agricoles en mer profonde. La capture de CO₂ par l'hydroxyde de calcium aqueux Ca(OH)₂ dans des eaux peu profondes, avec la reprise du dioxyde de carbone par chauffage de CaCO₃ pour produire du CaO et du CO₂, a aussi été proposée. Cette réaction, la calcination, est une étape principale dans la fabrication du ciment à partir du calcaire, la cassure de la liaison Ca-CO₂ nécessitant un apport substantiel d'énergie.

En outre, la séquestration à plus long terme du CO₂ en mer profonde a été étudiée. Pour un scénario donné d'émission, les captures par les océans peuvent sensiblement diminuer les niveaux atmosphériques maximaux de CO₂, bien que, dans tous les cas, ils rendent par la suite de nouveau du CO₂ à l'atmosphère. La réémission et les effets du pH pourraient être diminués en accélérant l'altération du carbonate minéral qui neutraliserait l'acidité océanique ainsi produite. Un processus de capture d'une grande portée est la réaction du CO₂ avec la serpentine de minerai. Celle-ci permet de séquestrer le carbone comme solide dans des « briques » de carbonate de magnésium, le temps caractéristique de rejet par la suite étant de l'ordre des temps géologiques. Enfin, étant donné que tout ceci est encore à l'état d'ébauche, des investissements substantiels de recherches sont nécessaires dès aujourd'hui pour rendre ces technologies disponibles à temps.

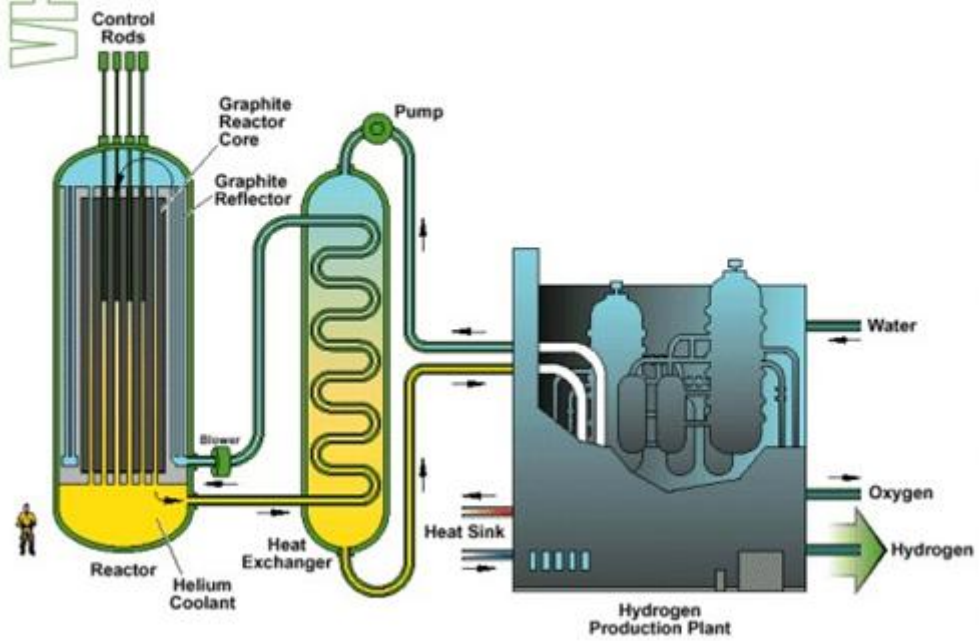
1.3 La production à partir du nucléaire [7]

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4^e génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 %. Aujourd'hui, une dizaine de pays travaillent sur cette innovation technologique : la France, les USA, le Japon, le Royaume-Uni, la Suisse, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada et la Corée du Sud. En outre, au total, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide, un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus. Le CEA a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haute température (1100°C), noté VHTR. Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement au sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040. Quant au projet

ITER de fusion nucléaire également productrice d'hydrogène, ses retombées ne sont attendues que pour la fin du siècle.

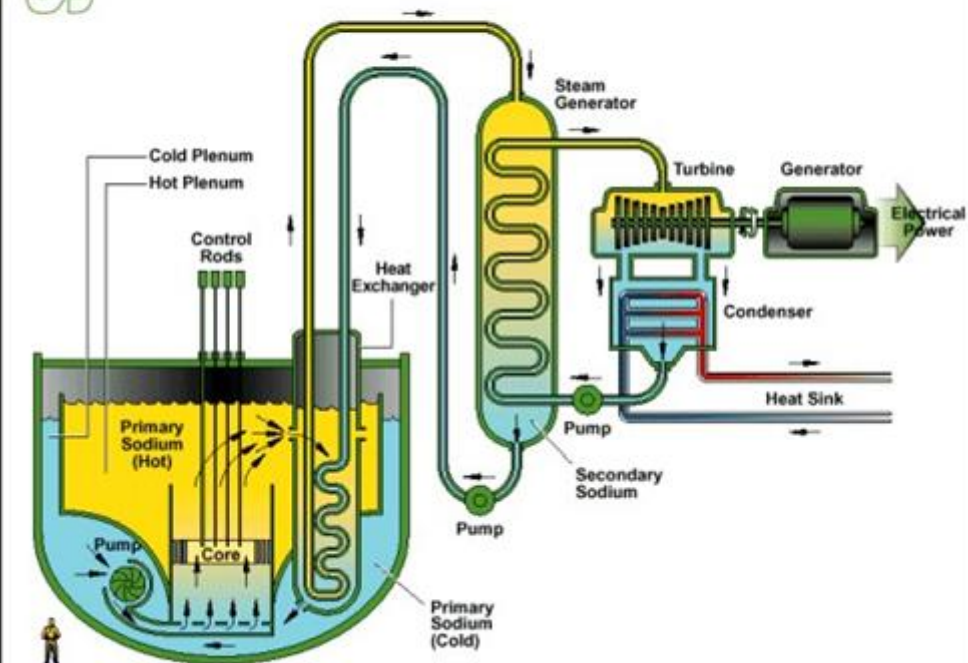
Very-High-Temperature Reactor

VHTR



Sodium-Cooled-Fast Reactor

SFR



1.4 La production par électrolyse

Jusqu'aux années 50, l'électrolyse de l'eau était utilisée pour la production d'hydrogène et d'oxygène. Aujourd'hui, l'électrolyse fournit seulement un petit pourcentage de l'hydrogène du monde, lequel est fourni aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non-simultanéité de la production par ces procédés avec les besoins des industriels et des individus. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65%, bien que, théoriquement, il est possible d'atteindre 80 ou 85%. Enfin, étant donné le prix élevé de l'électricité, le coût de l'électrolyse est bien supérieur à celui du reformage. Ainsi, afin d'augmenter la rentabilité du processus, il faudrait une électricité à plus faible coût.



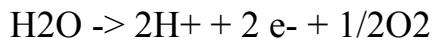
SNL Solar Power Tower

Fonctionnement de l'électrolyse

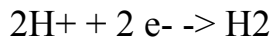
Du point de vue de la réaction électrochimique, il s'agit de la réaction inverse à celle qui a lieu dans une pile. La cellule électrolytique est formée de deux électrodes, une cathode et une anode, d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte est soit une membrane polymère échangeuse de protons soit une membrane céramique conductrice d'ions oxygène.

Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes :

- à l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation)



- à la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction)



Ainsi, grâce à du courant, l'eau est dissociée en hydrogène et en oxygène. Etant donné que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285kJ/mole, il faut nécessairement un apport d'énergie électrique. Le potentiel théorique correspondant est de 1.48V à 25°C, mais pratiquement, il s'agit plutôt d'un potentiel entre 1.7 et 2.3 V, ce qui correspond aux rendements cités ci-dessus.

1.5 Les procédés photolytiques [8]

1.5.1 Le procédé photobiologique

Certains microbes photosynthétiques produisent, au cours d'activités métaboliques, de l'hydrogène à partir d'énergie solaire. En utilisant des catalyseurs, le rendement de production d'hydrogène a pu atteindre 24%. De nombreux espoirs résident dans le procédé photobiologique, mais celui-ci devra surmonter, pour être efficace, la limitation de la sensibilité des enzymes vis-à-vis de l'oxygène. Les chercheurs tentent de résoudre ce problème en recherchant des organismes naturels qui soient plus tolérants envers l'oxygène. Une autre solution réside dans la création de nouvelles formes génétiques d'organismes végétaux qui puissent continuer à produire de l'hydrogène en présence d'oxygène. Un nouveau système de commutateur métabolique est également développé afin de créer un cycle entre une phase photosynthétique de croissance et une phase de production d'hydrogène.



1.5.2 La photoélectrolyse

Une autre option prometteuse pour le long terme est la photoélectrolyse. Ici, la lumière solaire agit sur une cellule photoélectrochimique, qui, immergée dans l'eau, produit des bulles d'hydrogène et d'oxygène. Les avantages de ce processus direct de production résident dans la suppression des coûts de l'électrolyseur et dans l'augmentation possible de l'efficacité globale du processus.

En effet, avec un rendement de 12% pour la pile photovoltaïque à silicium, multiplié par un rendement de 65% pour l'électrolyseur, on obtient pour un mécanisme indirect de production d'hydrogène un rendement de 7,8%. Le même rendement de pile photoélectrochimique donne, d'après des tests, un rendement total possible pour la pile photoélectrochimique de 10,2%, ce qui donne un gain total de 30%. Enfin, la plus importante barrière technologique pour ce procédé réside dans la fabrication de semi-conducteurs d'une part stables dans un milieu hydrique et électrolyte, et d'autre part capables d'absorber les photons solaires.

2 Le stockage et la distribution de l'hydrogène

2.1 Le conditionnement physique et chimique [\[9\]](#)

2.1.1 La purification

a) La purification en amont

Définition

Il s'agit de la purification des éléments permettant la production d'hydrogène. Elle permet d'éliminer en partie les poussières, les composés soufrés et les composés acides. L'objectif

de la recherche actuelle est la constitution d'unités de purification décentralisées. Le filtre ZnO est une possibilité, qui doit être approfondie.

Techniques

	Techniques
Poussières	<p>Centrifugation: particules plus grosses que 5 mm (taux de séparation 98%)</p> <p>Filtres pour purification plus fine:</p> <ul style="list-style-type: none"> * électrostatiques (residual dust content 75 - 100 mg/Nm³), * filtres à cartouche (residual dust content < 5 mg/Nm³)
Désulfuration	<p>MEA: absorption chimique</p> <p>MDEA: absorption chimique</p> <p>Purisol: lessivage physique dans lequel les composés COS sont convertis en H₂S qui est lui-même absorbé</p> <p>Filtre oxyde de zinc: $ZnO + H_2S \rightarrow ZnS + H_2O$ (dans le cas particulier de faibles concentrations de soufre (<1%))</p>
Composés acides	<p>CO₂-washing: pour les composés acides, utilisation d'une solution. La solution est régénérée par application d'un gradient de température, qui précipite les composés (H₂S, COS, HCN, CO₂) polluants</p>

Coûts estimés

Il n'est pas possible d'évaluer les coûts de purification de façon globale, car ils dépendent fortement des procédés utilisés, des matières premières et de la qualité voulue.

b) La purification en aval

Définition

Le but est de séparer les composés type CO, H₂O, O₂, NH₃ et CO₂ du gaz hydrogène produit.

Techniques

	Techniques
Procédés catalytiques [10] : pour le CO	CO + H ₂ O -> CO ₂ + H ₂
	méthanisation sélective (CO + 3 H ₂ -> CH ₄ + H ₂ O)
	oxydation sélective (CO + 1/2 O ₂ -> CO ₂)
Membrane	Utilisation des capacités de transmission des membranes, différentes selon les espèces chimiques. La plus efficace : membrane au Palladium, et Ag/Pd. Utilisation dans les industries chimiques et microélectroniques
Adsorption	pressure swing adsorption (PSA). L'hydrogène est contraint de passer à travers un filtre actif au carbone. Procédé discontinu, à cause du nettoyage du filtre.
	temperature swing adsorption process (TSA), pour l'élimination du CO ₂ , H ₂ S, COS, H ₂ O, O ₂ , NH ₃ et Hg
	Hydrure métallique : élève la pureté de deux ordres de grandeur

Coûts estimés

Les coûts des procédés catalytiques sont raisonnables, mais les autres méthodes sont très onéreuses. Aussi, les procédés actuellement en recherche sont :

- Petits purificateurs pour unités décentralisées, afin de réduire les coûts pour les procédés de membrane et d'hydride métallique. Solutions possibles : membrane céramique, ou amélioration du filtre palladium.
- Intégration de la purification et du stockage par les mêmes matériels.

2.1.2 La liquéfaction (LH₂) [\[11\]](#)

Définition

L'hydrogène est produit sous forme gazeuse, et à pression faible. La liquéfaction consiste à faire passer l'hydrogène de sa phase gazeuse à sa phase liquide. Cette forme de conditionnement présente l'avantage de conditionner l'hydrogène sous une forme « énergétique », c'est-à-dire que l'énergie disponible dans un volume donné est importante :

chaque litre de LH2 correspond à 2,36 kWh d'énergie. Toutefois, la liquéfaction présente un inconvénient majeur : elle est coûteuse en énergie. En effet, sous pression atmosphérique, H₂ n'est liquide qu'en dessous de 20 K. Même en augmentant préalablement la pression (ce qui est déjà gourmand en énergie) de façon à augmenter la température de liquéfaction, cette dernière reste très basse. Amener l'hydrogène à cette température sera donc coûteux.

Techniques utilisées

Technique Joule Thomson : Elle consiste en une succession d'échanges de chaleur. L'hydrogène subit des compressions, suivies de phase(s) d'expansion, soit irréversibles (utilisation d'une valve), ou partiellement réversibles via l'utilisation d'un expenseur. Il y a habituellement six étapes d'échange de chaleur (les échangeurs sont refroidis à l'azote liquide). Les expansions sont réalisées au moyen d'une valve Joule-Thomson.

Procédés magnétocaloriques : Ils consistent à transformer de l'ortho-hydrogène en para-hydrogène (jusqu'à une concentration de 95%). Le para-hydrogène a une énergie plus faible, ce qui permet d'obtenir de l'hydrogène liquide dont la température est de 21 K sous $p=1$ bar.

Ces deux techniques sont combinées. Elles permettent aux unités de liquéfaction actuellement en service de produire entre 3 et 60 tonnes d'hydrogène liquide par jour.

Coûts estimés

Coûts de structure : Les unités de production de LH2 coûtent de l'ordre de la dizaine de millions d'euros à la construction.

Coûts de fonctionnement : Produire un litre de LH2 (correspondant à 2,36 kWh d'énergie) coûte 0,9 kWh d'électricité. En outre, 45 L d'eau sont utilisés, ainsi qu'une petite quantité d'azote, essentiellement pour le refroidissement des échangeurs.

A court terme (quelques années), la consommation d'électricité pourrait être réduite de 25%, et, en tout cas, tomber facilement sous la barre des 0,8 kWh par litre de LH2. A plus long terme, l'amélioration de l'efficacité des procédés magnétocaloriques permettrait de tomber à 0,35 kWh par litre de LH2 pour certaines usines d'exploitation commerciale.

2.1.3 La compression (CGH2 compressed gas hydrogen) [\[12\]](#)

Définition

La compression est plus aisée à mettre en œuvre que la liquéfaction. Elle consiste à porter l'hydrogène à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Cependant, à une pression de 200 ou 350 bars et à température ambiante moyenne (soit 293 K), la densité de l'hydrogène est très inférieure à celle de l'hydrogène liquide.

		Densité	Energie disponible
LH2		71,1 kg.m ⁻³	2802,5 kWh.m ⁻³
20 K, 1 bar			
CGH2	1 bar	0,0827 kg.m ⁻³	3,26 kWh.m ⁻³

293 K	200 bar	14,49 kg.m ⁻³	571 kWh.m ⁻³
	350 bar	23,66 kg.m ⁻³	932,6 kWh.m ⁻³

Technique

Compression par le travail d'un moteur : Il s'agit de la technique utilisée pour le gaz naturel. Le matériel est exactement le même.

Le travail nécessaire à une compression isotherme est :

$$w = R_m \cdot T \cdot Z \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

avec $R_m = 4124 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, constante caractéristique de l'hydrogène gazeux

T, la température (en K)

$$Z = \frac{K(P_1) + K(P_2)}{2 \cdot K(P_1)}, \text{ le facteur de correction pour H}_2 \text{ avec } K(P) = 1 + \frac{P}{150 \text{ MPa}}$$

p_2 , le niveau de pression final

p_1 , le niveau de pression initial

Habituellement, la pressurisation est effectuée par étapes. La première peut être court-circuitée si l'hydrogène a été produit par électrolyse haute pression. Les surcoûts d'un tel électrolyseur sont donc partiellement compensés par l'économie de la première mise sous pression.

Estimation des coûts

Coûts de structure : Le matériel de compression du gaz naturel peut être facilement adapté à l'hydrogène ; les dimensionnements utiles sont déjà disponibles. Les coûts de structure sont donc réduits.

Coûts de fonctionnement : D'après la relation entre le travail et le niveau de compression, la pression initiale domine. Ainsi, comprimer de 1 à 10 bars demande autant d'énergie que de 10 à 100.

		Energie disponible	Coût
LH2		2802,5 kWh.m ⁻³	900 kWh.m ⁻³
20 K, 1 bar			
CGH2	p2=1 bar	3,26 kWh.m ⁻³	0 kWh.m ⁻³
	p2=200 bar	571 kWh.m ⁻³	176 kWh.m ⁻³

293 K p1=1bar	p2=350 bar	932,6 kWh.m ⁻³	340 kWh.m ⁻³
------------------	------------	---------------------------	-------------------------

2.2 Le stockage [13]

2.2.1 Le stockage classique

Définition

Le stockage classique correspond à l'utilisation de réservoirs, comme pour le gaz naturel, dans des conditions de température et de pression déterminées.

Techniques

	Stock immobilisé	Stockage mobile
CGH2	Techniques de stockage pour le gaz naturel utilisables. Grande échelle : stockages dans des poches souterraines, nappes, mines ou grottes. Petite échelle : Stockage externe dans des ballons sphériques, bouteilles en acier, de 2 à 50 L, pression de 20 MPa	Techniques développées pour le gaz naturel utilisables pour l'hydrogène. Contenance : 50 L à 400 L. Stockage entre 200 et 300 bars.
LH2	Jusqu'à 100 L, même technologie que l'hélium liquide. Il existe aussi une « super » isolation avec du refroidissement continu. Capacité : de 1500 L à 75000 L. Réservoirs avec isolation « perlit vacuum » ou « vacuum powder »	Les réservoirs sont constitués de 200 à 300 films isolants. Les réservoirs de bus sont constitués de trois réservoirs « elliptical cross section », chacun avec une contenance de 190 L ; densités d'énergie : 4 kWh.kg ⁻¹ environ.

Estimation des coûts

Coûts de structure : L'ordre de grandeur du prix d'un réservoir est le millier d'euros. Il varie selon le matériau.

Coûts de fonctionnement : Ce sont les coûts de l'évaporation. Ils varient de 0,4 à 1% par jour.

Il faut aussi ajouter les coûts indirectement générés par le stockage ; ce sont par exemple les coûts dus au poids (et au volume !) du réservoir embarqué sur un véhicule. Les réservoirs ont en effet une masse importante (~ 500 kg à vide pour une autonomie de 500 à 800 km). Pour une même quantité d'hydrogène, le volume de stockage peut être réduit en augmentant la pression mais cette augmentation entraîne un accroissement de l'épaisseur des parois et donc du poids du réservoir vide.

Pour surmonter ces inconvénients, les recherches actuelles portent sur :

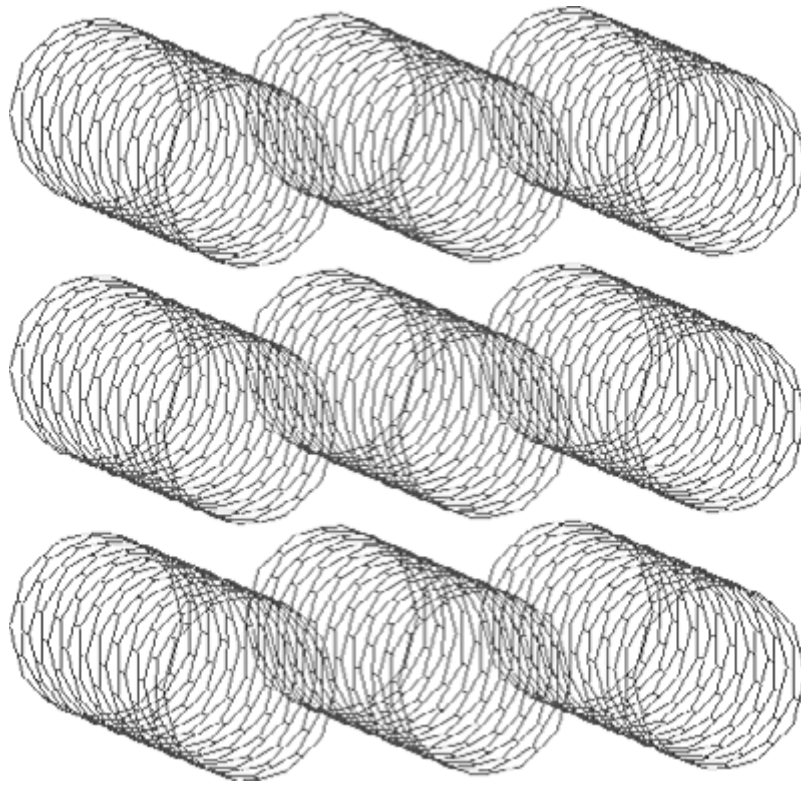
- les matériaux composites, résistants et légers ;
- les propriétés d'adsorption de matériaux poreux carbonés ou de composés métalliques.

2.2.2 Les matériaux poreux

Les matériaux poreux comme les charbons actifs sont constitués par des microcristaux de graphite. Ces cristaux sont enchevêtrés et forment des pores, de diamètre nanométrique. Les atomes d'hydrogène ont la propriété d'interagir avec les atomes de carbone : ils s'adsorbent sur le graphite. A 293 K et sous 1 bar, la densité des atomes adsorbés au voisinage d'une surface de graphite est 10 fois supérieure à la densité de l'hydrogène aux mêmes température et pression. Or, dans les matériaux poreux, la surface de contact entre le graphite et la lumière du pore est très grande. Elle atteint le millier de m² par gramme. Un matériau poreux peut donc constituer un mode de stockage de l'hydrogène gazeux. En effet, la masse d'hydrogène pouvant y être adsorbée est d'environ 40 kg.m⁻³, soit la densité du CGH₂ à 293 K sous 400 bars.

Ce mode de stockage est plus efficace à basse température, car l'agitation thermique y est réduite, ce qui augmente la densité des atomes d'hydrogène au voisinage des parois des pores. Le gain de capacité de stockage est ainsi de l'ordre de 100 % à 77 K et de 50 % à 150 K.

Exemple : *les nanotubes* : Ce sont des cylindres de graphite. Le stockage y est avantageux à 150 K et 50 bar, mais le gain n'est pas significatif à 293 K et sous 200 bar.



2.2.3 Les hydrures métalliques

Définition

Certains métaux (V, Pd, ...) ou composés (AB_n avec A correspondant à Y, Zr ou un lanthanide, et B un métal de transition) peuvent adsorber de façon réversible de l'hydrogène en grande quantité, et à pression et température ambiantes. En effet, la densité d'hydrogène dans un hydrure, représentant couramment $1,5 \text{ kWh.L}^{-1}$, peut dépasser celle de LH2. Le stockage dans les hydrures présente aussi l'avantage d'offrir une grande sécurité. Toutefois, le poids de l'hydrogène stocké représente moins de 7% du poids total du dispositif. De plus l'hydrogène adsorbé doit être très pur pour ne pas détériorer les propriétés adsorbantes du matériau. Enfin, selon l'AFH2, « il faut tenir compte des effets thermiques liés à l'hydruration (adsorption ou remplissage) et à la déhydruration (désorption ou vidage). L'hydruration est fortement exothermique ($\sim 150 \text{ kJ/kg}$) et la chaleur produite nécessite d'être évacuée. A l'inverse la déhydruration est endothermique et nécessite un apport de chaleur. Les températures de la réaction d'hydruration sont typiquement situées entre 300 et 650 K à des pressions de 0,1 à 10 MPa. Des protocoles ont été proposés pour l'utilisation des hydrures à bord de véhicules où on se sert de la chaleur produite par le fonctionnement du moteur pour la désorption, l'adsorption devant cependant s'accompagner d'un refroidissement du réservoir. »

Coûts estimés

Le prix des métaux et des alliages est élevé et à l'heure actuelle prohibitif à toute utilisation à grande échelle.

2.2.4 Un champ de recherche : le stockage haute pression dans des « microsphères »

Des sphères de verre (diamètres de moins de 100 microns) peuvent supporter des pressions allant jusqu'à 1000 MPa : elles permettraient une grande densité de stockage.

2.3 Le transport de l'hydrogène

Définition

Les besoins de transport de l'hydrogène varient avec son mode de production. Une production décentralisée, sur le lieu d'utilisation, ne demande que peu de transport. Il pourra prendre la forme d'un transfert sous forme gazeuse par gazoduc. Au contraire, une production centralisée en grande quantité nécessite un acheminement vers le lieu d'utilisation. Ainsi, l'hydrogène est acheminé vers les stations services comme les produits pétroliers provenant des raffineries. Dans ce dernier cas, l'état liquide est mieux adapté au transport par la route, ou le chemin de fer ou voie d'eau. Dans tous les cas, le transport de l'hydrogène entraîne une dépense d'énergie significative.

Techniques

	Dispositif mobile	Dispositif immobile
CGH2	Camion ou train, dans des bouteilles en acier sous 20 Mpa, quelques milliers de litres.	Réseaux de gazoducs [14] (pression de quelques MPa)
LH2	Camions de 5000 l. Bateaux	Quelques réseaux d'environ 40 km, aux USA

2.4 L'approvisionnement du client

2.4.1 L'approvisionnement pour le transport [\[15\]](#)

Les installations de distribution dépendent du mode de stockage de l'hydrogène à bord du véhicule : gaz comprimé, gaz liquéfié ou hydrures métalliques.

a) Les réservoirs à CGH2

Le transfert au client se fait par différence de pression (la réserve est maintenue à une pression de 5 MPa au dessus de celle du réservoir). Cependant, lors du remplissage du

réservoir, un échauffement se produit, ce qui entraîne une dilatation du gaz. Une fois refroidi, la pression du gaz aura diminué et la quantité délivrée sera inférieure à celle initialement prévue. Plusieurs solutions sont possibles :

- surdimensionner les équipements ;
- refroidir l'hydrogène avant son entrée dans le réservoir.

Une autre solution consiste à remplacer le réservoir vide par un réservoir préalablement rempli.

b) Les réservoirs à LH2

Les solutions imaginées sont assez proches de celles du CGH2.

c) Les réservoirs hydrures métalliques

L'hydruration (remplissage) est exothermique, ce qui exige un refroidissement. De plus, c'est un processus lent. Un remplacement de réservoir serait donc une meilleure solution.

2.4.2 L'approvisionnement dans les autres secteurs que le transport [16]

Une production centralisée nécessiterait un transport de quantités massives d'hydrogène ; une production décentralisée paraît plus adaptée. Dans ce cas, l'approvisionnement est moins problématique.

2.5 Le bilan énergétique de la distribution [17]

A. Récapitulatif des pertes énergétiques

		Unités centralisées	Unités décentralisées
Conditionnement Stockage	Compression entre 20 et 80 MPa	10 à 15 %	
	Liquéfaction	30 %	150 %
	Hydrures	20 à 50 %	
Transport	Camions	100 % pour 500 km	
	Gazoducs	1 à 4 %	
	Sur place		40 à 75 %

Production centralisée : L'hydrogène doit être transporté le moins possible et en évitant la route. Toutefois, pour les grosses quantités, le transport de LH2 est possible. Dans tous les cas, c'est le gazoduc qui est la meilleure solution.

Production décentralisée : La dépense relativement importante en énergie amène à privilégier les énergies renouvelables.

3 Les Applications de l'hydrogène

Cette troisième partie complète la chaîne de l'hydrogène, entamée avec sa production et son transport. Dans un premier temps, nous décrivons la Pile à Combustible que nous avons retenue comme convertisseur de l'hydrogène en énergie utilisable. Puis dans un second temps, nous expliciterons les différentes utilisations qui sont prévues : mobiles, stationnaires et portables.

3.1 La Pile à Combustible

3.1.1 Le fonctionnement de la PAC

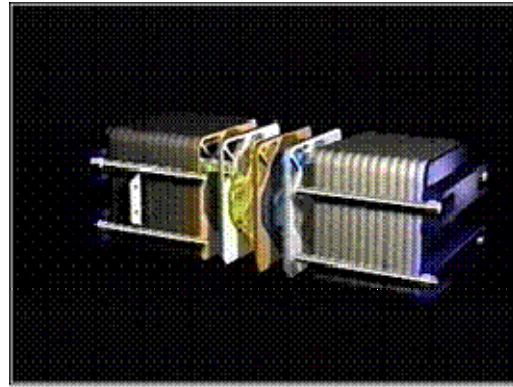
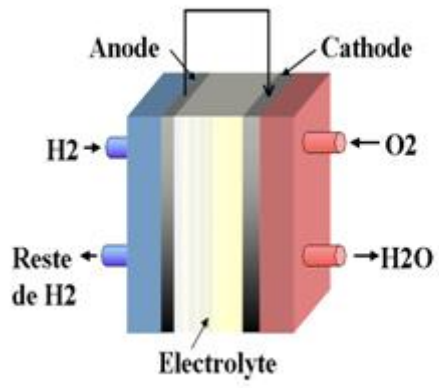
L'hydrogène étant seulement un vecteur énergétique, il est nécessaire de le transformer au bout de la « chaîne ». La Pile à combustible est l'outil de transformation que nous privilégions dans cette étude. Découverte en 1839, les PAC ont connu un nouvel essor avec le développement des programmes spatiaux de la deuxième moitié du XXème siècle. Depuis les années 1990, elles sont examinées avec grand intérêt par les industriels.

Comme toute Pile, la PAC convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Le combustible considéré est l'hydrogène qui est fourni en continu, ce qui peut permettre d'obtenir du courant de façon continue.

L'un des intérêts de la pile à combustible réside dans le fait que les températures sont d'un plus faible niveau que dans les turbines ou les moteurs à combustion. En ce qui concerne le carburant, le méthanol peut aussi être utilisé dans les piles à méthanol, mais leurs performances restent pour le moment inférieures à celles des piles à hydrogène. Pour utiliser des combustibles type méthane ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées: 800 à 1000°C. La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique, on entend souvent dire que l'hydrogène est le « combustible idéal » pour la PAC.

Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments : deux électrodes, un électrolyte. Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible, et la cathode est alimentée en oxygène ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène.

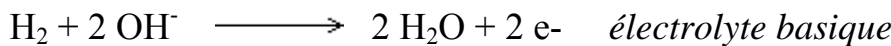
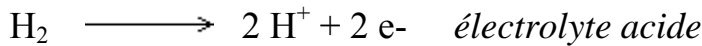
Principe élémentaire d'une pile et aperçu extérieur



©CFM

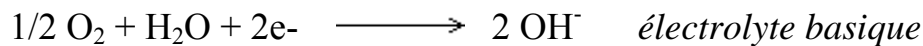
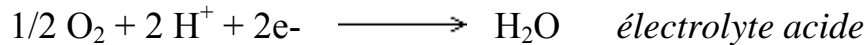
Les réactions

Dans le cas d'une pile hydrogène-oxygène, on a l'oxydation de l'hydrogène à l'anode selon:



Il s'agit d'une réaction catalysée. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

A la cathode, on assiste à la réduction cathodique, également catalysée, de l'oxygène selon:



Le bilan donne donc : $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{chaleur}$.

Cette réaction est exothermique : à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse. Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V. Cette tension dépend aussi de la température. On aura compris que la Pile à Combustible correspond à l'inverse exact du principe de l'électrolyse qui est présenté en première partie.

3.1.2 Le rendement de la PAC

Le travail récupérable correspond au déplacement des électrons dans le circuit extérieur. Il est égal à :

$$\mathbf{W = n F (E_a - E_c)}$$

avec E_a et E_c les potentiels à l'anode et à la cathode.

Thermodynamiquement, le rendement de la pile est égal au rapport entre le travail électrique récupérable et l'enthalpie de la réaction :

$$\eta = -\frac{W_e}{\Delta H}$$

On a déjà vu que ce travail était égal à :

$$\mathbf{W = n F (E_a - E_c)}$$

ce qui en exprimant le travail en fonction de l'enthalpie et de l'entropie donne

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T \Delta S}{\Delta H}$$

Pour une pile H₂/O₂ à 25°C, le rendement théorique est de 83% ou 95% selon que l'eau est liquide ou gazeuse.

Dans la réalité, il existe toujours des phénomènes d'irréversibilité des réactions : on vient de voir entre autres que les surtensions baissent le niveau de la tension théoriquement récupérable. Le rendement réel est donc inférieur à ce rendement thermodynamique idéal.

Citons plusieurs causes de baisse de rendement :

- *Baisse de rendement due aux surtensions*

Il y a en effet des surtensions aux électrodes et de résistance dans l'électrolyte. Le catalyseur utilisé, l'état des électrodes, l'utilisation de l'air au lieu d'oxygène pur ainsi que les conditions de température et de pression ont une influence déterminante sur la dissociation de l'hydrogène et de l'oxygène ainsi que sur les échanges au niveau de la zone de triple contact.

- *Rendement faradique*

Ce rendement tient compte du nombre d'électrons effectivement obtenus par mole de carburant présent. Pour l'hydrogène, on a en général un rendement de 1 (c'est à dire 2 électrons par mole d'hydrogène).

- *Rendement matière*

Ce rendement concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes. En effet, dans une pile, chaque ensemble "membrane-électrodes" doit être alimenté de manière identique, ce qui suppose un même débit et des pressions partielles identiques

- *Rendement système*

Que ce soit dans des applications mobiles ou stationnaires, une pile ne fonctionne pas seule : des composants périphériques sont nécessaires. Il s'agit du compresseur, du système de contrôle, des échangeurs de chaleur, du système de reformage (désulfuration, réformeur, échangeur, purification des gaz). Ces composants ont une consommation qui vient baisser le rendement.

- *Rendement général de la pile*

Le rendement de la pile est le produit de tous les rendements vus précédemment:

$$\eta_{pile} = \eta_{sys} \eta_{mat} \eta_{fara} \eta_{rev} \eta_{elec}$$

Exemple :

Considérons une pile PEMFC fonctionnant à 80°C avec de l'hydrogène avec une tension de 0,7 V pour 350 mA/cm². Le rendement théorique "rev" est de 0,936, le rendement "électrique" de 0,60, le rendement faradique de 1, le rendement matière peu être pris égal à 0,9, et le rendement système est de 0,8. Ceci donne un rendement total de 40,4%.

3.2 Les différentes utilisations

3.2.1 Le mobile

Les moyens de transport jouent un rôle essentiel dans la promotion de l'hydrogène auprès des industriels et des politiques. En effet, l'industrie automobile est concernée par une alternative depuis les crises pétrolières, tandis que certains lobbies environnementalistes y voient une possibilité de réduire les émissions de gaz polluant. L'option « Hydrogène » serait donc de doter les voitures de moteurs électriques alimentés par une PAC. L'utilisation des PAC est avantageuse sur plusieurs plans : il n'y a que de l'eau émise par le pot d'échappement, le véhicule est moins bruyant et le rendement est plus efficace que les moteurs à explosion. Cette dernière affirmation mérite d'être traitée en détail dans le 3.3) sur les aspects de « cycle de vie ».

Voitures



Il s'agit de l'enjeu industriel majeur en ce qui concerne le marché du transport. Les grandes entreprises développent des tests avec des véhicules à Pile à Combustible. L'Allemagne est à la pointe avec DaimlerChrysler, Opel et Ford. Les calendriers sont d'ores et déjà tenus puisque DaimlerChrysler veut mettre à la vente une Classe A à PAC à l'horizon 2005. Néanmoins, la concurrence du méthanol subsiste encore, et le principal obstacle est l'absence de toute infrastructure de diffusion de l'hydrogène comparée à la présence du réseau de stations-services.

Transports en commun



Le secteur des transports en communs est aussi visé. L'industriel allemand MAN a programmé un modèle de bus pour la ville de Berlin équipé de la PAC. De même DaimlerChrysler désire tester des cars « Nébus » en service normal pour les prochaines années.

Camions, Ferroviaire, Navires



En fait, on peut trouver des modèles à Pile à Combustible, donc impliquant l'hydrogène, pour presque n'importe quel moyen de locomotion. L'utilisation de l'hydrogène pour les camions n'a pas connu de réel développement, en partie à cause de l'efficacité du Diesel sur les longues distances. Comme nous l'avons cité, le développement le plus exploré est celui des transports en commun urbains, car ces véhicules ont un trajet bien défini (ravitaillement facile) et une limitation quotidienne de leur kilométrage. De la même manière, les bateaux qui manoeuvrent dans les zones urbaines tels les ferries pourraient baisser leurs émissions. L'absence de son et de vibrations offrirait un agrément supplémentaire.

La Pile à Combustible utilisée pour la propulsion sera la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) : elle seule satisfait aux critères de rapidité, de niveau de température... L'hydrogène est par définition le meilleur pour alimenter la pile à combustible. Pour le moment, il ne peut être stocké que sous forme gazeuse (haute pression : de 300 à 700 bars) ou liquide (à - 253°C). Mais ces formes de stockage sont insuffisantes en termes de densité gravimétrique et volumétrique. L'utilisation de l'hydrogène nécessite dans tous les cas la mise en place de l'infrastructure de production, de transport et de distribution avec par exemple des stations service (où l'hydrogène pourrait être obtenu par reformage du gaz naturel). Mais si l'hydrogène devait être utilisé, on se retrouverait face au problème de l'oeuf

et de la poule: qui doit être introduit en premier, les véhicules à PAC ou l'infrastructure nécessaire?

D'ici là, il sera sans doute nécessaire d'utiliser un carburant intermédiaire (essence, méthanol, éthanol...) dont on obtiendra de l'hydrogène par [reformage](#) à l'intérieur du véhicule. Dans le même ordre d'idées, les véhicules hybrides qui sont à l'honneur avec la Prius de Toyota et l'Insight de Honda, peuvent constituer une transition vers les véhicules à hydrogène. Le principe de ces véhicules est simple: il combine les caractéristiques des voitures électriques et des voitures à essence. On a en fait deux sources d'énergie pour la traction : le moteur traditionnel thermique à essence et le moteur électrique alimenté par des batteries.

L'application à l'industrie automobile est donc porteuse d'enjeux énormes mais n'est pas sans poser de problèmes. D'un point de vue pratique, les constructeurs tablent sur 15 à 20 ans pour que ces véhicules atteignent une part de marché intéressante. Mais avec près de 60 millions de nouveaux véhicules vendus chaque année, les 20 à 25 % espérés sont loin d'être négligeables. La condition première reste l'abaissement des coûts : le prix du kilowatt est aujourd'hui de 6000 euros. Selon des spécialistes, il faudrait qu'il soit de l'ordre de 50 euros (300 francs), ce qui passe peut-être par une « révolution technologique ».

3.2.2 Le stationnaire

Les applications stationnaires sont les plus diversifiées parmi les applications des piles : cela tient à plusieurs choses:

- un large spectre de puissance du kW à plusieurs MW ;
- des applications allant de l'approvisionnement d'électricité à la cogénération en passant par la génération de vapeur ou de froid ;
- divers types de piles possibles.

On peut distinguer la production décentralisée - avec en particulier les applications stationnaires de faible puissance (résidentiel, secours...) ainsi que la cogénération de moyenne puissance (quelques centaines de kW) - et la production centralisée d'électricité sans valorisation de la chaleur.

a) La production décentralisée



Des piles de faible puissance peuvent être placées dans des habitations, sites isolés, bâtiments administratifs... Ces applications stationnaires mettant en jeu soit un apport exclusif d'électricité (systèmes de secours ou de sécurité), soit de la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur), sont l'une des possibilités qui pourrait le plus vite déboucher sur le marché. Les puissances types sont de l'ordre du kW. Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance de l'ordre de quelques centaines de kW ont été installés aux USA, au Japon et en Europe. Il s'agit là en général de cogénération pour alimenter des sites industriels ou des réseaux de chaleur. Les unités de plus d' 1 MW restent encore rares à l'heure actuelle.

Le marché stationnaire décentralisé est relativement vaste puisqu'il concerne les applications domestiques comme industrielles ou le secteur tertiaire. Les applications domestiques concernent un particulier ou un secteur résidentiel avec chauffage central collectif (l'électricité mais aussi la chaleur produite par ce dispositif sont compatibles aux besoins d'une maison : chauffage, eau chaude, piscine ou réfrigération). Les applications industrielles sont dirigées vers la moyenne industrie ou les PME (électricité, vapeur, eau chaude...). Le secteur tertiaire est aussi concerné pour des bâtiments spécifiques type administratifs, hôpitaux, piscines, maisons de retraite, centres commerciaux... ainsi que les applications de secours ou de sécurité servant à alimenter des systèmes sensibles (banque..).

Dans un marché en constant changement (ouverture à la concurrence) et face à une demande croissante en électricité, les piles à combustible représentent des sources de production d'énergie délocalisée très intéressantes. Elles peuvent constituer une solution dans le cas de lieux isolés où il est difficile ou même coûteux, d'installer des lignes électriques (site classé, montagne ...). Les piles à combustible pourraient assurer une distribution fiable et indépendante des intempéries et même permettre une économie dans le coût de transport et d'installation. Ce n'est peut être pas aussi vrai en France dont la production d'électricité est plus tournée vers le nucléaire et donc centralisée, mais d'autres pays se tournent vers d'autres choix. Des pays aussi gigantesques que les Etats Unis ont besoin de production délocalisée.

La pile à combustible se révèle intéressante pour les besoins simultanés en électricité et en chaleur, voire en froid puisque à la fois chaleur et électricité sont produits par les piles. Mais on peut aussi envisager des demandes soit uniquement en électricité ou en chaleur ou distinguer selon que les besoins dominants seront en électricité ou en chaleur. Les deux étant produits par une pile (dans un ratio dépendant du type de pile), il est possible de revendre la chaleur et consommer l'électricité (ou inversement), consommer les deux ou bien consommer une partie de la chaleur et de l'électricité produites et revendre le surplus à un tarif convenu avec un fournisseur d'énergie.

La pile à combustible offre un meilleur rapport électricité - chaleur que ces concurrents dans le domaine (moteurs, micro turbines...). Cependant, les coûts sont encore bien trop élevés pour que les piles puissent actuellement avoir une pénétration conséquente dans le marché stationnaire car leurs concurrents ont des coûts de revient beaucoup plus bas. Les coûts d'investissement se situent actuellement entre 3500 et 10000 Euro/kW (pile, auxiliaires et production d'hydrogène) et on estime qu'ils devraient passer à moins de 1000 Euro/kW.

Les coûts de maintenance ainsi que la durée de vie des composants restent encore des inconnues. Il faut tenir compte de la possibilité ou non de revendre le surplus d'électricité au réseau, et à quel prix. A ces difficultés d'ordre économique s'ajoutent les problèmes purement technologiques tel que leur durée de vie, l'empoisonnement du catalyseur, la réalisation de plusieurs cycles départ/arrêt successifs sans dommages... Quant au bilan environnemental, il semble globalement favorable aux piles à combustible : les émissions de CO₂ et de NO_x seraient inférieures à celles de leurs concurrentes.

b) La production centralisée

Parmi les types de production d'électricité, on peut trouver pour les piles différents types d'application : les applications de secours, la production d'appoint reliée ou non au réseau ou une production centralisée d'électricité. Les piles à combustible dépassent rarement la taille d'1 MW, cependant des études sont faites sur des centrales de plusieurs centaines de MW. Celles-ci pourraient ainsi remplacer les centrales thermiques trop polluantes. Cependant seules les piles "haute température", c'est à dire les MCFC et SOFC sont adaptées à de telles applications : on peut en effet leur adjoindre une turbine à vapeur ou à gaz (voire les deux derrière une SOFC) et ainsi produire de l'électricité avec un rendement très élevé: des rendements de plus de 70% sont annoncés. De même que les installations de cogénération, ces systèmes peuvent servir à la production décentralisée d'électricité. De construction modulaire, avec de faibles nuisances sonores, ces installations peuvent être installées près des utilisateurs.

3.2.3 Le portable

Téléphones et ordinateurs portables



En mars 2003, des piles à combustible pour portables ont été présentées à un salon pour l'informatique à Hannovre : une des premières occasions pour les piles de se montrer hors des salons spécialisés. Toshiba, Masterflex et Smart Fuel Cell ont présenté leurs prototypes au public. Si 2003 sera une année de présentation des prototypes, 2004 semble celle annoncée du lancement des piles pour les applications portables, si l'on en juge par les annonces faites par les constructeurs.

Les piles à combustible peuvent être de toutes les tailles grâce à leur modularité : de moins d'1 Watt à plusieurs MW, ce qui permet la création de piles de très petite taille ne comportant que quelques cellules et ayant une petite surface. Les piles de petites taille ont en effet de réelles chances dans un marché d'appareils électroniques en constante croissance : téléphones portables, ordinateurs, caméscopes, agendas électroniques. D'où l'intérêt des industriels pour les piles d'une puissance entre 0.1 et 10 Watts. Tous ces appareils portables souffrent actuellement de leur faible autonomie : il est nécessaire de les recharger régulièrement. Au contraire, avec une pile à combustible, l'autonomie ne dépend que de la taille du réservoir de carburant (hydrogène ou méthanol) : il est ainsi possible de recharger une batterie assurant la fourniture d'électricité.

Parmi les différents types de piles, deux seulement sont susceptibles d'avoir des applications portables : il s'agit des PEMFC et DMFC. Ces deux piles sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement, entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique. Le principal défi est la miniaturisation des piles : du point de vue architecture, la micro pile devra donc soit être une version réduite des PEMFC et DMFC actuellement développées, soit être radicalement différente. En effet certains, comme le CEA, s'orientent sur des pistes différentes: en se basant sur les techniques de la micro-électronique, ils créent une pile constituée d'éléments faits avec de nouveaux matériaux (membrane en polyimides sulfonés ou électrodes en mélange polymère conducteur avec du platine) et empilés (sous forme de couches minces de quelques microns) sur un substrat de silicium.

Le marché des appareils électroniques portables est en continuelle expansion : il ne concerne pas seulement les ordinateurs portables, les téléphones ou les assistants de poche, mais aussi tous les jeux de poche, les systèmes d'alarme, des appareils de camping, voire des appareils individuels de santé. Un téléphone portable consomme en moyenne 1 W en conversation, et 50 mW en veille. Un ordinateur portable a besoin d'environ 10 W. Aux attentes en termes de puissance et de prix, s'ajoutent la nécessité de pouvoir recharger ces appareils de façon simple et rapide et surtout de leur assurer une autonomie plus importante que celle qu'ils ont actuellement. D'autant que la consommation de ces appareils risque d'augmenter dans les années à venir avec la multiplication des fonctionnalités : internet sur les portables... La réponse à ce besoin pourrait donc se faire rapidement avec l'apparition des micro-piles.

Par rapport aux batteries, les piles ont des densités d'énergie de 3 à 5 fois plus élevées, ce qui multiplie par autant la durée d'autonomie des appareils. Autre avantage des piles : elles n'ont pas besoin d'être rechargées puisqu'elles fonctionnent en continu du moment qu'elles sont alimentées en carburant (en général sous forme de capsule). Manhattan Scientifics annonce une autonomie de 6 semaines en veille et d'1 semaine de conversation avec un téléphone portable grâce à ses micro-piles.

Si de nombreux constructeurs s'intéressent de près à l'émergence de ce marché, ils se montrent discrets sur les performances atteintes par les systèmes. Néanmoins, des prototypes ont déjà été présentés à la presse, montrant que ces piles sont fonctionnelles et capables de faire fonctionner des appareils électroniques portables. Parmi ces constructeurs, on trouve : Ballard, Motorola, Global Thermoelectric, Manhattan Scientifics...

Etant donné qu'il existe un réel besoin en termes d'autonomie pour les applications portables, la pile à combustible peut devenir une solution. Sa part de marché pourrait atteindre 10 % de celui des batteries rechargeables d'ici 2010. Cependant cette technologie a encore besoin de mûrir (en particulier en ce qui concerne la miniaturisation) et le coût de ces systèmes doit être acceptable, or les coûts d'investissement demeurent très hauts. On estime que le coût à atteindre devrait être d'1 Euro/Watt.

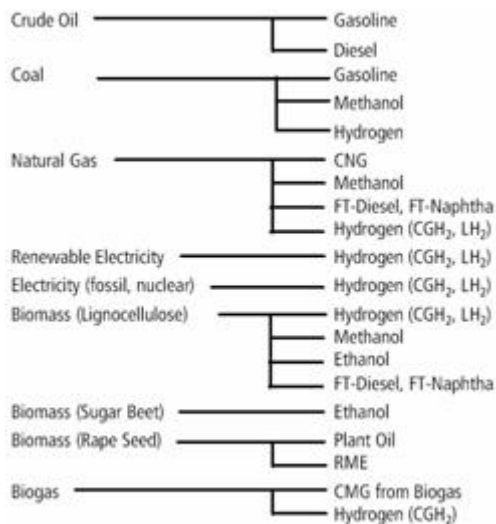
4 Les filières de l'hydrogène

4.1 L'Analyse du Cycle de Vie

4.1.1 Le principe général du LCA

L'Analyse du Cycle de Vie, Life Cycle Assesment en anglais, permet d'intégrer les trois précédentes parties et de présenter les filières Hydrogène dans leur ensemble. Il consiste d'abord à combiner les différentes méthodes de production, de stockage, de transport et d'utilisation pour décrire toutes les filières théoriquement possibles. On obtient alors un schéma du type suivant :

Les différentes filières Hydrogène



L'ACV permet de quantifier un effet comme le coût, la pollution ou le rendement pour une filière donnée. En effet, cela a peu de sens de parler du rendement de la PAC et du moteur électrique, par exemple, sans connaître celui de la production de l'hydrogène nécessaire à cette utilisation. Une fois ces calculs effectués, on peut connaître ensuite l'impact de plusieurs filières énergétiques et les comparer entre elles. On peut alors dégager un concurrent crédible aux filières traditionnelles, du type essence dans le cas du transport. Dans la suite, nous avons choisi l'exemple du transport automobile pour analyser l'impact que pourrait avoir une politique « Hydrogène » à son égard. La problématique du changement climatique restant notre préoccupation principale, il faudra donc examiner en particulier l'efficacité énergétique et les éventuelles émissions de gaz à effet de serre.

4.1.2 La méthodologie et la nomenclature

L'ACV compte traditionnellement plusieurs étapes. Elles se résument en quatre principales :

- ✓ La production de l'infrastructure et des véhicules à hydrogène ;
- ✓ La production de l'hydrogène ;
- ✓ L'utilisation de l'hydrogène (les caractéristiques du véhicule sont à prendre en compte) ;
- ✓ Le démantèlement et recyclage des infrastructures et véhicules à hydrogène.

En pratique, les premier et dernier points ne sont pas pris en compte car les données sont difficiles à établir, et on subodore que leurs effets sont moindres que les deux autres. Notons que nous n'avons pas occulté le stockage même s'il est l'intermédiaire entre la production et l'utilisation. Ces deux étapes ont la nomenclature suivante :

- ✓ La production : c'est le Well-To-Tank (WTT) autrement dit du puits énergétique au réservoir de carburant ;
- ✓ L'utilisation : c'est le Tank-To-Wheel (TTW) autrement dit du réservoir de carburant à la roue qu'on souhaite faire tourner.

L' ACV est naturellement soumise à certains problèmes pratiques. On compte en effet :

- ✓ Les données ne sont pas les mêmes d'une source à l'autre, et parfois inexistantes dans certains cas ;
- ✓ Les technologies considérées ne sont pas encore à maturité, donc on ne connaît pas tous les rendements potentiels ;
- ✓ Théoriquement, un nombre quasi-infini de filières sont possibles en combinant les moyens de production, stockage et exploitation.

Dans toute la suite, nous décrivons des ACV dans le cadre particulier de l'utilisation du transport. Nous avons choisi de restreindre ainsi le nombre de filières possibles. Par ailleurs cette application est particulièrement motivée par la R&D des grandes industries automobiles. Ceci explique que la littérature à son propos soit particulièrement riche, et nourrisse des polémiques. Nous avons souhaiter rendre compte dans cet exemple de la diversité d'opinions et de conclusions au sujet de la filière Hydrogène en présentant des études d'ACV d'un cabinet de consultants pour les énergies renouvelables d'une part, et d'un membre de l'Institut Français du Pétrole d'autre part. Nous les surnommerons les hypothèses « optimiste » et « pessimiste ».

Finissons par décrire les filières dont nous parlerons dans la suite. Que ce soit dans l'hypothèse optimiste comme pessimiste, certains termes reviennent régulièrement :

- ✓ Gasoline, Diesel : les filières conventionnelles servant de repère ;
- ✓ Référence à la partie I sur les moyens de production :
 - Résiduel Wood, wood plantation : à partir du bois
 - NG : à partir du gaz naturel
 - Nuclear : à partir du nucléaire
- ✓ Référence à la Partie II : la différence CGH_2/LH_2 .

Ceci permet de comprendre les dénominations du type CGH_2 NG.

4.2 L'exemple du transport : l'hypothèse optimiste

Il s'agit d'une étude rendue en septembre 2003 par L-B-Systemtechnik GmbH, un cabinet allemand pour les énergies renouvelables et les systèmes de transport. Cette étude est particulièrement intéressante car elle détaille les étapes de l'ACV pour plusieurs critères. Présentons ses résultats pour les deux critères qui retiennent notre attention dans le cadre du changement climatique : la perte d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre. Auparavant, elle approfondit les performances des véhicules, ce qui se révélera primordial par la suite où on verra que c'est la principale source de rendements améliorés par rapport à la filière conventionnelle.

4.2.1 Les caractéristiques des véhicules

Les caractéristiques matérielles des véhicules sont essentielles en tant que bout de la « chaîne ». Le tableau ci-dessous évalue l'efficacité des véhicules en fonction de leur modèle. Pour les véhicules à hydrogène, on a considéré la Pile à Combustible comme transformateur en énergie électrique. Il s'agit d'une synthèse de deux études : General Motors (2002) calcule l'efficacité des véhicules (en commençant par celle des moteurs), et le MIT (2003) calcule le gain en termes d'émissions de CO₂ (unité : g/km).

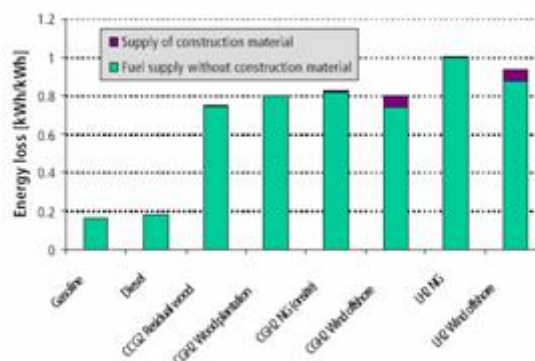
	Rendement (GM)	Consommation Fuel équivalent (MIT)	CO ₂ (MIT)
Prévision 2010 Gasoline (BASE)	0%	0%	128
CH₂	+53%	-61%	0
CH₂ hybride	+57%	-66%	0
LH₂	+54%	Cf. CH ₂	0
LH₂ hybride	+58%	Cf. CH ₂ hybride	0

Une fois ce tableau établi, on peut mettre en évidence les progrès possibles en cas de véhicules à hydrogène en matière de perte d'énergie (Energy use), et d'émissions de gaz à effet de serre (GHG Emissions) pour les véhicules hybrides et non hybrides.

4.2.2 Les pertes d'énergie : Energy use

Etudions les pertes d'énergie des filières Hydrogène. Cette problématique est bien cohérente avec notre sujet puisqu'une filière économe diminue par effet de volume ses éventuelles externalités négatives. Ainsi un carburant pourrait être plus polluant mais aussi plus « dense » d'énergie et se retrouver par là-même plus intéressant. Le graphe suivant est représentatif de ce qu'on peut trouver dans les ACV. Les différentes filières sont présentées en abscisse et leurs pertes en ordonnée.

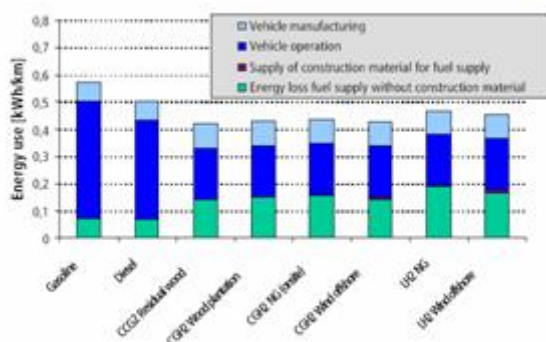
Energy Loss of Fuel Supply (WTT) - per Energy Content



Source: LBST, Energy requirements and GHG emissions for construction material: preliminary estimate

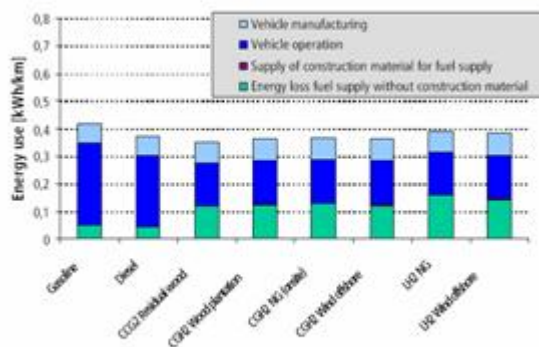
On se rend compte que dans la première partie de la chaîne, WTT, les filières Hydrogène sont globalement perdantes par rapport aux classiques puisqu'elles perdent plus d'énergie. C'est là qu'interviennent les caractéristiques des véhicules, autrement dit la deuxième partie de la chaîne qui est nettement en faveur de l'Hydrogène. Ainsi, au total (WTW), les filières à H₂ ont un meilleur rendement énergétique que le couple Gasoline, Diesel. Les graphes suivants corroborent cette affirmation en distinguant les véhicules hybrides et non-hybrides.

Energy Use Well-To-Wheel: Non-hybrid Vehicles



Fuel consumption of vehicles and energy requirements and GHG emissions for vehicle manufacturing: [MIT 2003] Weiss, M., A.; Heywood, J., B.; Schafer, A.; Natarajan, V., K.; MIT: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars; February 2003. Fuel supply: LBST

Energy Use Well-To-Wheel: Hybrid Vehicles

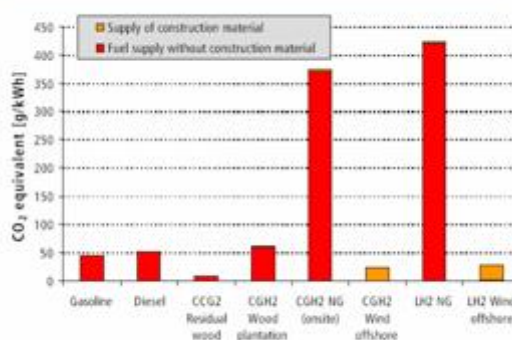


Fuel consumption of vehicles and energy requirements and GHG emissions for vehicle manufacturing: [MIT 2003] Weiss, M., A.; Heywood, J., B.; Schafer, A.; Natarajan, V., K.; MIT: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars; February 2003. Fuel supply: LBST

4.2.3 Les émissions de gaz à effet de serre : GHG Emissions

Une deuxième composante de l'effet environnemental est la production de gaz à effet de serre : Green House Gaz Emissions. Il s'agit d'un sujet actuellement très sensible, qui se trouve au coeur de notre Atelier Changement Climatique. De la même façon que pour l'Energy use, on distingue la chaîne en deux étapes. La première, WTT, présente les résultats suivants :

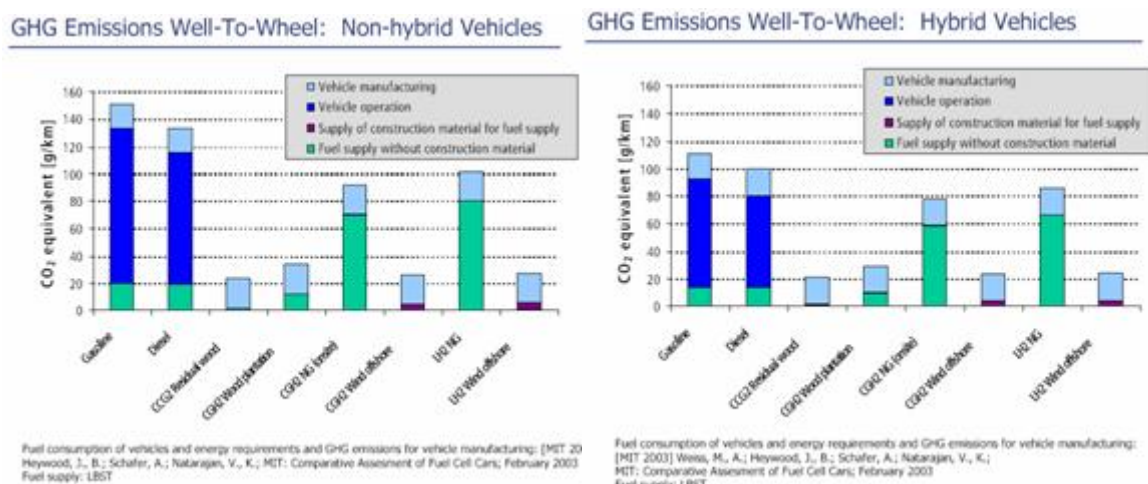
GHG Emissions of Fuel Supply (WTT) - per Energy Content



Source: LBST, Energy requirements and GHG emissions for construction material: preliminary estimate

On se rend compte une nouvelle fois que certaines filières Hydrogène sont bien plus polluantes que les conventionnelles, dans la phase de production. Il s'agit plus précisément de celles issues du Gaz Naturel, ce qui est logique avec ce que nous avons évoqué en partie 1 : le dégagement important de CO₂ lors du vaporeformage. Néanmoins, lorsqu'on intègre

toute la filière WTW, l'absence totale de dégagement de CO₂ dans les moteurs à hydrogène (cf. Partie 3) compense cet effet et nous avons les graphes suivants :



4.2.4 Conclusion de l'hypothèse optimiste

L'Analyse du Cycle de Vie prend ici tout son sens puisque ces graphes n'ont pas du tout la même allure si on ne prend pas la chaîne en entier (Well to wheel) mais seulement son début c'est-à-dire la production d'hydrogène (Well to tank). C'est dans le schéma global que la filière Hydrogène prend tout son intérêt, étant donné que les gains d'efficacité du véhicule sont très importants comparativement au moteur à explosion classique. Néanmoins nous remarquons que toutes les filières ne sont pas forcément avantageuses et qu'il ne faut pas parler de « la filière Hydrogène » mais bien « des filières Hydrogène ».

La mise en évidence de filières plus performantes que d'autres nous amène à prendre un peu de recul. En effet en revoyant les graphes on se rend compte que les filières Hydrogène les plus performantes sont celles à partir d'énergies renouvelables : CGH₂ Wood plantation, CGH₂ Wind offshore, LH₂ Wind offshore. On voit bien que ce n'est totalement pas dissocié du fait que L-B-Systemtechnik GmbH effectue des activités de conseil dans les énergies renouvelables. La volatilité des données et de leur interprétation nous conduit à considérer d'autres ACV, en particulier chez des institutions moins optimistes sur l'Hydrogène. Cette quatrième partie présente donc les forces et études en présence, et ne saurait avoir la prétention de dire laquelle est la plus pertinente.

4.3 L'exemple du transport : la problématique du coût

Une première critique, tout à fait justifiée, que l'on peut faire à l'étude suivante est de ne pas prendre en compte l'aspect économique. Une énergie non polluante n'a que peu d'intérêt si elle n'est pas commercialement acceptable par le plus grand nombre. Cette remarque prend tout son sens dans le cas de l'automobile où la masse des consommateurs est plus sensible au prix du carburant qu'à son effet néfaste sur l'environnement.

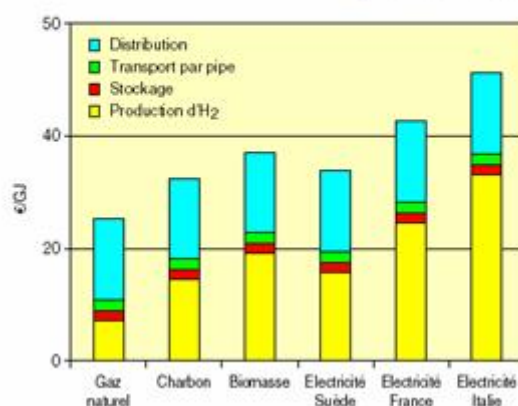
Les enjeux économiques sont les véritables défis de la filière « automobile à hydrogène ». Les principaux détracteurs de cette alternative mettent en évidence des coûts trop élevés,

même dans les hypothèses optimistes. Nous prendrons, dans la problématique du coût la voix de l'IFP qu émet des remarques pertinentes. Reprenons quelques-unes des études de coûts.

4.3.1 Le coût du « Puits au Réservoir »

De même que pour l'Analyse du Cycle de Vie pour l'environnement, il est intéressant d'établir dans un premier temps un coût du Puits au Réservoir des différentes filières.

Fig. 5 Estimation des coûts des filières hydrogène comprimé « du puits au réservoir » en fonction du prix de la matière première en €/GJ (dans le cas de l'électrolyse, le prix de l'électricité constaté en juillet 2002 a été retenu)



On voit que la fourchette des prix intégrés se situe entre 20 et 50 Euro/GJ. A titre de comparaison, les filières traditionnelles du pétrole coûtent environ 8 Euro/GJ. Les améliorations possibles, en plus d'innovations technologiques, se trouvent dans une meilleure gestion de la distribution : on envisage à ce titre d'utiliser la structure déjà existante des stations service pour y mettre des petites unités de production d'hydrogène. Néanmoins, le coût du puits au réservoir n'est pas le seul à prendre en compte. Dans notre souci d'intégrer tous les types de coût, il faut étudier la consommation du véhicule.

4.3.2 La consommation du véhicule

Pour cela, on fait l'hypothèse avantageuse pour l'hydrogène que le prix d'un véhicule équipé d'une Pile à Combustible est identique à celui d'un engin classique. Le tableau suivant met en évidence le coût aux 100 Km pour les différentes filières.

	Consommation (MJ/100 km)	Coût du carburant (Euro/GJ)	Coût (Euro/100 km)
MCI+essence	224	8	1.8
MCI+gazole	184	8	1.5
MCI Hybride+gazole	141	8	1.1
PAC + H₂ comprimé	84	25	2.1

ex-gaz naturel			
PAC + H2 comprimé	84	32	2.7
ex-charbon			
PAC + H2 comprimé	84	37	3.1
ex-biomasse			
PAC + H2 comprimé	84	42	3.5
ex-électricité France			

Source : IFP d'après «Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context», EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003

On voit que le prix aux 100km reste supérieur de 15 à 100% aux solutions contemporaines. Il reste en effet de nombreux défis à l'industrie automobile à hydrogène, qui sont autant de surcoûts à réduire, pour s'affirmer comme un concurrent de l'automobile traditionnelle.

4.3.3 Les leviers évoqués

La PAC n'est pas proposée à un coût équivalent à celui des moteurs à combustion interne. Le coût des piles fabriquées à quelques exemplaires est supérieur à 3000 €/kW, comparé aux 30 à 50 €/kW pour les moteurs à combustion interne conventionnels, produits, il est vrai, en masse. Mais, même en émettant l'hypothèse d'une production des piles à grande échelle (plusieurs centaines de milliers d'exemplaires), l'avantage reste au moteur à combustion interne. En effet, le coût de production des PAC resterait compris entre 100 et 200 €/kW, soit trois à quatre fois plus qu'un moteur conventionnel, et ceci sans prendre en compte les moteurs électriques nécessaires à faire avancer le véhicule.

Parmi les éléments qui constituent la PAC, la membrane de la pile mais également le platine (Pt) catalyseur indispensable pour faire fonctionner ce type de convertisseur d'énergie sont les éléments les plus onéreux. Entre 50 et 100 g de Pt sont nécessaires pour faire fonctionner une PAC membranaire à basse température dans de bonnes conditions de durabilité, de rendement et de performance. Cette valeur est considérée par beaucoup comme trop élevée. En effet, la simple généralisation de la PAC au marché français (soit environ 2 millions de voitures par an) suffirait à générer une demande de l'ordre de 100 à 200 tonnes/an de platine, soit à peu près la consommation mondiale annuelle de ce métal précieux.

Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule reste également coûteux. Aujourd'hui, dans les meilleurs cas, des coûts de l'ordre de 1000 €/kg d'hydrogène stocké sont annoncés,

certaines sources prévoyant même des valeurs quatre fois plus élevées. Or, ce sont 4 à 5 kg d'hydrogène qui sont nécessaires pour assurer au véhicule une autonomie suffisante (400 à 500 km), ce qui signifie qu'il faut aujourd'hui déboursier, au minimum, de l'ordre de 4000 à 5000 € pour le stockage à bord du véhicule. Ce chiffre est à comparer aux 125 € que coûte un réservoir d'environ 40 litres pour un véhicule classique.

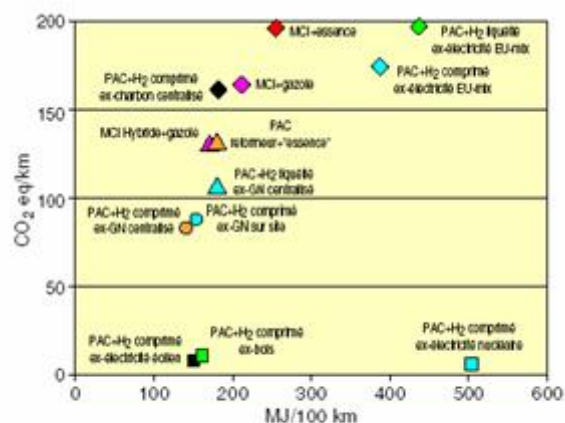
La production à grande échelle permettrait, certes, de réduire le coût du réservoir mais seulement dans la fourchette de 200 à 500 €/kg d'hydrogène selon le DOE (Département de l'énergie américain), qui indique que des progrès importants restent à faire dans ce domaine. Ainsi, si techniquement le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule est maîtrisé, il reste encore de nombreux travaux de recherche à réaliser, notamment pour en abaisser le coût. Le DOE a d'ailleurs fixé des objectifs très ambitieux dans ce domaine, puisqu'en 2015 le coût du stockage de l'hydrogène devra être de l'ordre de 66 €/kg, soit une réduction d'un facteur 5.

4.4 L'exemple du transport : l'hypothèse pessimiste

La remarque du coût nous fournit la transition pour évoquer l'hypothèse pessimiste, elle aussi relayée par des études de l'IFP. De la même façon que pour L-B-Systemtechnik GmbH, on comprend qu'un tel organisme n'est pas totalement neutre à l'avenir de l'hydrogène. Celui-ci est en effet un concurrent direct au carburant classique issu du pétrole.

4.4.1 L'Analyse du Cycle de Vie de l'IFP

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'établir de façon plus précise l'intérêt des filières hydrogène en matière d'émission de gaz à effet de serre (GES) et de consommation d'énergie. Nous tirons ce graphique d'une étude de Stéphane His, IFP, de décembre 2003. Y sont positionnées les performances des différentes filières dans leur globalité, « du puits à la roue » WTW, pour effectuer 100 km, tant en termes de pertes d'énergie que d'équivalent CO₂ émis. Les pertes d'énergie sont en abscisse et les dégagements de CO₂ en ordonnée.



MCI : moteur à combustion interne ; PAC : pile à combustible.
 Source : « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003

Plusieurs résultats significatifs ressortent de cette analyse, que nous citons de l'article.

- ✓ Le véhicule PAC alimenté par de l'hydrogène comprimé ex-éolien ou ex-biomasse présente les meilleurs résultats en termes de rejet de gaz à effet de serre. En termes de consommation énergétique, ces solutions s'avèrent parmi les plus performantes même si le gain reste faible, en particulier, par rapport aux véhicules hybrides (véhicule associant un moteur à combustion interne et un moteur électrique). Ces deux options présentent cependant le même inconvénient : le volume potentiel de production d'hydrogène par ces voies reste limité.
- ✓ Le véhicule PAC alimenté par de l'hydrogène ex-électricité, via l'électrolyse, présente des bilans contrastés. Si l'origine de cette électricité est le nucléaire, le résultat est excellent en termes de rejet de gaz à effet de serre, mais beaucoup plus médiocre en termes de consommation globale d'énergie. Si l'électricité est produite à partir de la répartition moyenne actuelle européenne des différents modes de production, alors la filière ne présente aucun avantage ni vis-à-vis des émissions de GES, ni en termes de consommation d'énergie. Il faudrait donc une modification profonde des systèmes de production d'électricité en Europe avec un développement massif des énergies renouvelables (ENR) ou une large diffusion des technologies de capture et du stockage géologique du CO₂.
- ✓ Les solutions PAC utilisant de l'hydrogène ex-gaz naturel présentent un bon bilan, puisqu'elles permettent une réduction de 30 % en consommation d'énergie et de près de 50 % en rejet de gaz à effet de serre par rapport à la référence gazole. Ce gain est bien évidemment moindre si on le compare à la solution hybride puisqu'il n'est plus que de 35 % pour les rejets de gaz à effet de serre et de 15 % environ pour ce qui est de la consommation d'énergie. Par ailleurs, on notera l'effet négatif de la liquéfaction qui pénalise de près de 30 % cette option par rapport à la solution « hydrogène comprimé », aussi bien en termes de consommation d'énergie que d'émissions de gaz à effet de serre. Il faut également souligner que le bilan « effet de serre » de ces options à base de gaz naturel pourrait être amélioré, si elles sont envisagées avec capture et stockage géologique du CO₂ généré.
- ✓ Les solutions PAC avec reformeur embarqué n'offrent que très peu d'avantages par rapport aux solutions à moteur à combustion interne. Pour cette dernière conclusion, on gardera à l'esprit qu'il s'agit d'un des modèles à hydrogène les plus réalistes pour le moment, et que le commentateur de l'étude est affilié à un organisme promouvant la filière pétrolière.

4.4.2 Les leviers évoqués les plus récents

Nous évoquons ici les leviers que décrit Pierre-René Bauquis en janvier 2004 dans les « cahiers de l'économie ». Ce dernier souhaite affaiblir l'alternative « Hydrogène+PAC » au profit d'un large recours aux hydrocarbures de synthèse, accompagné d'une forte pénétration de l'électricité par le biais de véhicules hybrides rechargeables. Il fait l'hypothèse principale que les hydrocarbures quadrupleront leur prix à moyen-long terme. En guise de conclusion de cette partie, citons les points essentiels de ses récentes remarques.

- ✓ La production est actuellement réalisée à 98% à partir d'hydrocarbures et de charbon. Bauquis traite ces méthodes avant d'étudier d'éventuelles alternatives :
 - Les méthodes de production de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures ne sont pas satisfaisantes. Elles coûtent deux fois plus cher que les hydrocarbures utilisés s'ils sont « chers » (reformage du gaz naturel) et cinq fois plus cher s'ils sont « bon marché ». Par ailleurs cela ne règle pas durablement la question de raréfaction des hydrocarbures. De même le recours au charbon est nécessairement limité car les coûts liés à l'émission de CO₂, en fait à sa ségrégation, sont élevés.
 - Parmi les autres procédés, la plus réaliste est l'électrolyse. Si on fait recours massivement aux voies électrolyse, il faudrait disposer massivement d'électricité non « émettrice » de CO₂. C'est donc le nucléaire qui jouerait ce rôle pour assurer les transports de demain, sauf percée technologique majeure. Il faudra alors développer des réacteurs du type HTR ou génération 4 qui combinent bon rendement énergétique et utilisation efficace de combustibles fissiles.

- ✓ Le stockage : Bauquis soutient la thèse que la compacité énergétique de l'hydrogène est très bonne par masse, mais très médiocre par volume. Ce dernier élément en fait un très mauvais vecteur énergétique en matière de transports terrestres. Il avance les chiffres suivants :
 - Le transport de l'hydrogène par canalisation coûtera deux fois plus cher que celui du gaz naturel, qui est cinq fois plus cher que celui des hydrocarbures liquides. Il s'agit selon lui de propriétés thermodynamiques intrinsèques, sans plus de précisions, qui ne peuvent être dès lors améliorées.
 - La mise à bord et le stockage dans un véhicule coûtent cent fois plus cher que pour les carburants classiques. Dans tous les types de stockage (très haute pression, chimiquement combiné ou adsorbé) sauf l'hydrogène liquéfié cryogénique, la difficulté est liée à la faible masse d'H₂ par rapport à celle du contenant nécessaire. Ceci annule d'ailleurs l'effet de sa bonne capacité énergétique massique. En ce qui concerne l'hydrogène liquide cryogénique, les limitations sont plus posées en terme de volume du réservoir, de consommation d'énergie pour la liquéfaction de l' H₂ et de « boil off » c'est-à-dire la nécessaire évaporation du liquide cryogénique. Ceci n'est pas tolérable pour des véhicules particuliers, pouvant être garés un certain temps.

- ✓ Au total, l'Hydrogène lui apparaît un très médiocre vecteur énergétique en terme de coûts à trois stades essentiels : production, logistique tant massive que capillaire, et stockage à bord des véhicules. L'efficacité énergétique de son utilisation dans des piles à combustibles ne saurait compenser entièrement ces handicaps. L'existence de situations exceptionnelles comme l'Islande bénéficiant de circonstances locales, ne sont pas en mesure -à elles seules- d'infirmes ses conclusions.

5 Les technologies critiques et la dynamique d'émergence de l'hydrogène

Dans les années à venir, les besoins en énergie vont aller croissants. Bien que les progrès techniques permettront certainement des économies, la demande en énergie continuera à augmenter. Or, les énergies non renouvelables ne sont pas disponibles en quantité illimitée, le développement d'autres sources d'énergie apparaît donc inévitable.

Ces sources d'énergies ne seront pas nécessairement exclusives ; il est probable qu'elles soient diversifiées et se complètent. Et, au moins dans un premier temps, lors de leur émergence, ces sources cohabiteront avec les sources non renouvelables : charbon, pétrole...

Parmi ces sources, l'hydrogène semble envisageable[18] dans le futur, compte tenu de l'état actuel de la technique. L'analyse cycle de vie montre en outre que l'hydrogène permettrait, selon l'application et la production choisies, de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'utilisation d'énergies non renouvelables. Pourtant, des critiques[19], comme celles évoquées dans la partie précédente, mettent en lumière les verrous limitant le développement de l'hydrogène, voire le remettant totalement en question. Le diagnostic doit donc être nuancé. A la fois les résultats de la LCA et les critiques portant sur l'hydrogène ne doivent pas être considérés comme absolus, mais plutôt replacés dans un horizon temporel, et convenablement circonscrits au niveau de la chaîne énergétique qu'ils concernent. Autrement dit, avantages et critiques sont loin d'être absolus, ils sont avant tout relatifs, et c'est ce dernier caractère qui fait l'objet de cette partie. C'est en évaluant la portée des critiques, et au vu des perspectives de recherche, qu'il est possible d'envisager une dynamique[20] de l'émergence de l'hydrogène.

5.1 L'analyse de court terme (2010)

Au niveau de l'alimentation mobile miniature, subsiste un verrou économique relativement facile à faire sauter, vu les progrès incrémentaux et attendus qu'il suppose. Les micropiles, petits réservoirs embarqués existant déjà, seront très vraisemblablement diffusées plus largement comme alternative aux classiques piles lithium. Malgré leur coût encore élevé, ces micropiles sont compétitives par rapport à ces piles lithium ou à certaines batteries rechargeables de téléphones portables ou de microordinateurs, aujourd'hui encore très onéreuses.

En revanche, l'alimentation des transports comporte encore des verrous sérieux. Ils sont de deux ordres, principalement. D'une part, il existe un verrou politique. Les lobbies des pétroliers et des constructeurs automobiles n'ont en effet que très peu intérêt au développement de l'hydrogène, les premiers parce qu'ils verraient une partie de la demande énergétique se détourner, les seconds parce que les frais de R&D requis seraient énormes.

Aussi, la pression qu'ils exercent empêche un développement important de l'hydrogène dans les transports à court terme. D'autre part, il existe un verrou technique majeur, qui demanderait, pour être levé, une innovation colossale, et très improbable à court terme. Il s'agit du stockage de l'hydrogène, aujourd'hui soit trop cher (LH₂), soit trop volumineux (CGH₂), soit trop massif (réservoir utilisant l'adsorption) pour les transports. Aussi, dans le champ des transports, seule une multiplication des expérimentations semble aujourd'hui probable de la période actuelle jusqu'à 2010. On peut citer le projet actuel « Cute » d'équipement de villes européennes en bus à H₂.

Cette évolution à court terme est conditionnée au soutien (public) suffisant de la recherche sur les technologies critiques, notamment le stockage et la sécurité, le rendement des piles, ainsi que leurs coûts et leur longévité.

5.2 L'analyse de moyen terme (2020)

A moyen terme, il est raisonnable de penser, au vu des mesures et des prévisions actuelles de réchauffement climatique, que la diminution de l'émission des gaz à effet de serre deviendra une préoccupation de premier ordre, à audience politique large. Cette hypothèse pourrait, si elle est vérifiée, ce qui n'est pas invraisemblable, lever des verrous, qui à court terme semblent insurmontables, tant d'un point de vue de la production énergétique, que de son utilisation.

Du point de vue de l'utilisation, deux verrous pourraient sauter. Il s'agit du verrou politique ; la position des lobbies des pétroliers et des constructeurs automobiles est de moins en moins recevable sur la scène publique. Même les solutions de rechange proposées, comme l'hydrogénation de charbon ou de pétrole (permettant de polluer un peu moins) ne sont plus perçues comme suffisantes. Le verrou social pourrait être levé également. Ce verrou est basé sur la peur du risque que constitue, dans l'esprit de beaucoup, une énergie telle que l'H₂ : risque d'explosion des réservoirs, sensible dans le transport notamment. Ce verrou pourrait être levé, il ne demande pas d'innovation technique majeure, mais le risque d'explosion devient en effet psychologiquement moins important que celui lié au réchauffement climatique. Autrement dit, une peur en surpasserait une autre, ou en tout cas deviendrait moins acceptable socialement qu'une autre. En revanche, un verrou technique persiste. Le stockage de l'H₂ demande une innovation majeure et encore incertaine, sauf dans le domaine du transport aérien (où les contraintes de poids existent, mais moins les contraintes de volume).

Du point de vue de la production, l'augmentation de la demande demanderait un accroissement de l'offre. Parmi les différentes technologies envisageables, seules certaines semblent susceptibles d'être développées : la production à partir d'électricité, notamment nucléaire, et à partir d'énergies non renouvelables utilisées dans des unités centralisées

permettant la séquestration du CO₂. En effet, ces deux modes de production permettraient de répondre aux préoccupations de réduction des gaz à effet de serre. Les autres méthodes semblent bloquées par des verrous. Le reformage du gaz naturel est bloqué par un verrou économique ; il serait en effet trois fois plus cher « à la pompe » que les énergies classiques. Productions éolienne et géothermique seraient bloquées par des verrous économique (transport onshore) et technique (stockage). Enfin, un verrou politique freinerait la production d'H₂ à partir de biomasse : les contraintes d'utilisation des sols dans les pays en ayant le plus besoins (Chine et Inde, par exemple, du fait de leur forte démographie) seraient en effet sensibles. La recherche serait orientée vers d'autres sources d'énergie non carbonées, comme les sources d'énergie solaire, thermique ou nucléaire.

5.3 L'analyse de long terme (après 2020)

Les contraintes liées aux verrous technologiques deviennent plus difficiles à évaluer. Mais, un verrou, économique celui-là, devient particulièrement sensible : il s'agit du renouvellement du parc de centrales nucléaires. Ce renouvellement pose un sérieux problème, puisqu'une augmentation du prix de l'électricité est à prévoir, alors que l'électricité nucléaire avait été identifiée à moyen terme comme une des principales sources de production d'H₂.

En tout cas, les besoins en infrastructures de distribution devraient aller croissant. L'économie sera vraisemblablement à énergie multi sources.

Conclusion

Le champ de l'hydrogène est arborescent : il existe de nombreuses technologies de production et de nombreuses applications possibles. Une présentation exhaustive, esquissée dans les trois premières parties de cette étude, reste difficile.

L'hydrogène a sa place dans les systèmes énergétiques. En effet, il présente des avantages indéniables, en termes de rendements comme en termes d'émissions de gaz à effet de serre, avantages qui pourraient participer à sa généralisation dans un contexte de souci croissant concernant le réchauffement climatique.

Néanmoins, cette place dans les systèmes énergétiques n'est pas à surestimer. D'une part, l'analyse cycle de vie atteste de la très grande dépendance des rendements et des émissions de gaz à effet de serre vis-à-vis de la technologie utilisée pour la production, la distribution et l'application finale. D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que de tels avantages ou inconvénients sont relatifs à une période donnée, c'est-à-dire datés. Il est vraisemblable que l'hydrogène sera plutôt un des vecteurs énergétiques disponibles, tant dans les domaines des applications miniatures mobiles, que dans celui des transports. Dans ce dernier champ, la dynamique d'émergence sera certainement plus lente ; et elle ne sera très probablement pas exclusive, c'est-à-dire que l'hydrogène cohabitera avec d'autres vecteurs énergétiques.

L'évaluation de la filière hydrogène à laquelle nous avons procédé à partir de notre quatrième partie est relativement concentrée sur les problématiques de transport. Une telle démarche pourrait être répétée pour d'autres applications, comme la fourniture d'énergie domestique et le chauffage particulier. Cette étude serait d'ampleur bien plus importante, mais elle permettrait de décrire un panorama plus large.

Bibliographie

Stéphane His, IFP, *L'Hydrogène, vecteur énergétique du futur ?*, Décembre 2003

http://www.ifp.fr/IFP/fr/fichiers/cinfo/IFP-Panorama04_11-HydrogeneVF.pdf

Kei Yamashita et Leonardo Barreto, IIASA, *Integrated Energy Systems for the 21st Century : Coal Gasification for Co-producing Hydrogen, Electricity and Liquid Fuels*, Septembre 2003

http://www.iiasa.ac.at/collections/IIASA_Research/Admin/PUB/Documents/IR-03-039.pdf

Martin I. Hoffert, Ken Caldeira et al., *Advanced Technology Paths to Global Climate Stability : Energy for a Greenhouse Planet*, Science, Novembre 2002

fire.pppl.gov/science_adv_energy_103102.pdf

L-B-Systemtechnik, *Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study*, Juillet 2003

<http://www.lbst.de/gm-wtw/>

Jörg Schindler, *LCA of Hydrogen Fuel*, Septembre 2003

http://www.hyweb.de/Wissen/pdf/H2-LCA_EHEC_Schindler_03SEP2003.pdf

Commission Européenne, *Hydrogen energy and fuel cells, a vision for our future, High level group for Hydrogen and fuel cells, Summary Report*, Juin 2003

http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hlg_summary_vision_report_en.pdf

Werner Zittel, Reinhold Wurster, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, *Hydrogen in the Energy Sector*, Juillet 1996

<http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-eng4.html>

-

Pierre-René Bauquis, *Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle ?*, Les cahiers de l'économie, Janvier 2004

Liens Internet

www.eere.energy.gov : site du département américain de l'énergie

www.hyweb.de : site d'information sur l'hydrogène et les piles à combustible

www.hynet.info : site thématique européen sur l'hydrogène

www.lbst.de : site de la fondation allemande Ludwig-Bölkow sur les énergies propres

www.ena.or.jp/WE-NET/index.html : site japonais sur l'hydrogène

[1] Le budget alloué en 2004 par le département américain de l'énergie à la problématique de l'hydrogène atteint les 1,20 milliards de dollars, celui de l'Union Européenne atteignant les 2 milliards d'euros.

[2] Stéphane His, IFP, *L'Hydrogène, vecteur énergétique du futur ?*, 2003

[3] <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/production.html>

[4] Kei Yamashita et Leonardo Barreto, IIASA, *Integrated Energy Systems for the 21th Century : Coal Gasification for Co-producing Hydrogen, Electricity and Liquid Fuels*, 2003

[5] <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/production.html>

[6] Martin I. Hoffert, Ken Caldeira et al., *Advanced Technology Paths to Global Climate Stability : Energy for a Greenhouse Planet*, Science, 2002

[7] <http://energy.inel.gov/gen-iv>

[8] <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/production.html>

[9] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html>

[10] L'utilisation de telle ou telle méthode dépend des conditions : température, pression, flux, concentration, catalyseurs disponibles. Les procédés peuvent être combinés.

[11] http://www.afh2.org/index.php?page=memento_fiches , fiches 4.2 et 4.3

[12] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html> , fiche 4.2 et 4.3

[13] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html> , fiche 4.4

[14] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html> , fiche 4.1

[15] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html> , fiche 4.5.1

[16] <http://www.hyweb.de/Knowledge/w-i-energie-w-eng4.html> , fiche 4.5.2

[17] « The Future of the Hydrogen Economy Bright or Bleak ? », B. Eliasson et U. Bossel, *Fuel Cell World*, April 15, 2003 ; disponible sur le site : <http://www.efcf.com/reports>

[18] On pourra se reporter, entre autres, à <http://www.lbst.de/gm-wtw/> et http://www.hyweb.de/Wissen/pdf/H2-LCA_EHEC_Schindler_03SEP2003.pdf

[19] <http://www.ifp.fr/IFP/fr/cinfo/fd05.htm#panorama>

[20] Dynamique envisagée dans le document de la Commission
http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hlg_summary_vision_report_en.pdf

Moteur à eau

Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.



Cet article, bien que respectant dans une certaine mesure la [neutralité de point de vue](#), est jugé trop incomplet dans son développement ou dans l'expression des concepts et des idées. Son contenu est donc à considérer avec précaution. Pour toute information complémentaire, veuillez consulter sa page de discussion et la [liste des articles incomplets](#).

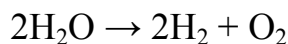
Le **moteur à eau** est un [moteur](#) fonctionnant avec comme unique [carburant](#) l'[eau](#) (H₂O) seule, en complément d'un autre carburant ou d'un [additif](#).

L'intérêt de ce type de moteur est évidemment qu'il consommerait un carburant potentiellement gratuit, renouvelable, et non polluant ; il s'agit cependant d'une illusion comme nous le verrons plus loin, puisqu'il nécessite une source d'électricité, dont la fabrication est elle-même polluante. Malgré les problèmes théoriques fondamentaux qu'un tel moteur soulève, certains sont persuadés de sa viabilité. Il semble qu'aucun moteur de ce type ne soit utilisé à ce jour, ce qui n'empêche pas l'abondance de témoignages, de [canulars](#), d'escroqueries, de mythes urbains et d'expériences sur ce sujet.

[\[modifier\]](#)

Principe du moteur à eau pure

La plus fréquente des théories concerne l'utilisation d'un [moteur à explosion essence](#) classique, légèrement modifié pour éviter l'[oxydation](#) due à l'eau et aux [vapeurs](#) de celle-ci. Le principe est d'[électrolyser](#) l'eau afin d'en séparer les [atomes](#) d'[hydrogène](#) et d'[oxygène](#):



et d'utiliser l'hydrogène comme élément combustible. L'hydrogène, combiné à l'oxygène provoque une puissante explosion au contact d'une étincelle. C'est le même principe qu'avec l'essence : un gaz combustible (l'essence est vaporisée avant d'entrer dans le cylindre et c'est un mélange gazeux essence/air qui explose au sein du moteur), enflammé à l'aide d'une étincelle provoquée par une bougie, qui en « explosant » repousse le piston... ([cycle de Beau de Rochas](#)).

L'[énergie](#) produite par ce type de moteur serait cependant inférieure à l'énergie électrique nécessaire à l'électrolyse, ce qui est scientifiquement incontestable lors d'une électrolyse classique : en effet, le [rendement](#) des différentes étapes (électrolyse et explosion) est inférieur à 1, une grande partie de l'énergie part sous forme de chaleur (le rendement d'un moteur à explosion de manière générale est assez faible) ; il aurait mieux valu utiliser cette électricité directement pour un moteur électrique.

Cependant, selon les partisans du moteur à eau, en réalisant une électrolyse pulsée à une certaine [fréquence](#), celle-ci demanderait beaucoup moins d'énergie, en utilisant le principe de [résonance](#), et dans ce cas l'électrolyse serait rentable.

Le problème de cette théorie est qu'elle contrevient aux lois de la physique, et en premier lieu à la loi de conservation de l'énergie : aucun processus physique ne peut dégager plus d'énergie qu'il n'en consomme. Deux molécules de dihydrogène et une molécule de dioxygène, « contiennent » plus d'énergie (sous forme de [liaison moléculaire](#)) que deux molécules d'eau. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la réaction entre hydrogène et oxygène produit une explosion et dégage de l'énergie : cette explosion correspond à la

dispersion de l'énergie « en trop » ! Donc, pour séparer l'eau en hydrogène et en oxygène, il faudra fournir au moins la même quantité d'énergie que celle fournie par la réaction inverse. Même si la totalité de l'énergie dégagée par la combustion de l'hydrogène était réutilisée pour l'électrolyse, cela signifierait qu'il ne resterait plus d'énergie pour faire avancer le véhicule ! Ajoutons qu'un moteur cyclique (comme un moteur de voiture) doit nécessairement dissiper une certaine quantité d'énergie en chaleur inutilisable — principe de [Carnot](#), base de la [deuxième loi de la thermodynamique](#).

Le principe de séparer l'hydrogène de l'oxygène, puis de les recombinaison pour obtenir de l'énergie, est cependant intéressant pour une autre raison : la combustion de l'hydrogène est très peu polluante, puisqu'elle ne produit que de l'eau. C'est la justification principale du moteur à hydrogène, ou [pile à combustible](#) à l'hydrogène. Encore une fois il importe de préciser que le processus complet (incluant la production d'hydrogène), comme tout processus physique, implique nécessairement une perte nette d'énergie utilisable. Alternativement, on peut utiliser dans la pile un autre composé hautement énergétique (par exemple du méthanol) dont l'hydrogène est extrait chimiquement. Dans ce cas le moteur consomme un combustible pour fournir de l'énergie, comme un moteur essence classique, mais utilise l'hydrogène comme intermédiaire, ce qui le rend potentiellement moins polluant qu'un moteur à essence (bien que dans ce cas la réaction finale produise du CO₂ en sus de l'eau).

[\[modifier\]](#)

Pile à combustible

Toutefois, la création d'énergie à partir de la recombinaison de dioxygène et de dihydrogène est déjà utilisée, mais de manière contrôlée et non pas de manière explosive : dans les [piles à combustible](#). Cette recombinaison contrôlée génère de l'électricité qui peut être utilisée par exemple pour faire fonctionner un moteur électrique. Il s'agit d'une sorte de [batterie](#), en fait.

On a là aussi un véhicule produisant exclusivement de l'eau.

L'argument de la perte de rendement et du report de la pollution s'applique ici aussi : n'aurait-il pas mieux valu utiliser directement l'électricité nécessaire pour faire tourner le moteur ? Certe, mais c'est le problème général du stockage de l'électricité : les moyens de production en masse d'électricité ne sont pas aisément embarquables dans une voiture. Et la voiture, au final, pollue par la pollution de la centrale électrique.

[\[modifier\]](#)

L'eau comme additif dans le carburant

Certaines personnes ont proposé de mettre de l'eau dans le carburant. En effet, l'eau vaporisée a une grande énergie cinétique (principe de la [machine à vapeur](#) et des [vapocrackers](#)). Selon ces personnes, l'ajout dosé d'eau dans un moteur bien réglé permettrait de diminuer la consommation d'essence. Il faut toutefois noter que la vaporisation de l'eau est extrêmement gourmande en énergie (c'est d'ailleurs l'effet de refroidissement induit qui est entre autres utilisé dans l'[extinction des incendies](#)) — si la vapeur d'eau a une grande énergie cinétique, c'est qu'on la lui a transmise.



Energie solaire thermique

© MRW

Sources techniques principales:
extraits des chapitres "Solaire thermique actif" et "Les Installations thermiques actives", rédigés par Daniel Comblin (Energies Douces) pour le ["Guide des Energies Renouvelables"](#), édité par le Ministère de la Région Wallonne (courtoisie du Ministère de la Région Wallonne (MRW)).



Capteur solaire thermique
Photographie de Paul De Neyer

... Menu ...

<p>Qu'est-ce ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • En bref 	<p>En détail</p> <ul style="list-style-type: none"> • Historique ... En cours de réalisation ... • Situation contemporaine ... En cours de réalisation ... • Principaux types de capteurs solaires thermiques et fonctionnement • Avantages et limites • Principales applications • Réalisations 	<p>Pour en savoir plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Personnes-ressource et associations • Liens sur la "toile" • Liens dans Ecotopie • Bibliographie • Centres de démonstration
---	---	--

Qu'est-ce ?

- **En bref :**

Le solaire thermique actif permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air*, le plus souvent de l'eau, par la mise en oeuvre de capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales, par exemple.

* la distinction entre le passif et l'actif est parfois controversée, comme dans le cas de murs trombe (à air).



En détail

- **Historique**

... En cours de réalisation ...

- **Situation contemporaine**

... En cours de réalisation ...

- **Principaux types de capteurs solaires thermiques et fonctionnement**

Un capteur solaire est composé des éléments suivants:

- le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant,
- un système de refroidissement par le fluide caloporteur,
- un isolant thermique (dos et côtés non exposés),
- une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre,
- subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

Les capteurs à concentration

Nous passerons rapidement sur les capteurs à concentration, dont l'utilisation en Région wallonne est aléatoire. Ce type de capteurs ayant besoin, en effet, du rayonnement solaire direct (lorsque le soleil est visible), on constate de manière évidente que leur utilisation restera très limitée (entre 1.500 et 1.700 heures d'ensoleillement par an en moyenne).

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Dans un concentrateur cylindro-parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400C. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures plus élevées (jusqu'à 1.500C). Ces types de collecteurs solaires sont plus adaptés pour la production de chaleur industrielle et d'électricité.



Les capteurs-plans

- L'absorbeur

Trois fonctions lui incombent:

- absorber le rayonnement solaire,
- le transformer en chaleur,
- transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation - voir plus loin); cette surface doit être dotée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevée possible.

Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cet aspect noir ait été obtenu par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture (celle-ci étant toujours plus ou moins isolante).

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infra-rouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif.

Après transformation du rayonnement en chaleur sur la face superficielle exposée, il y a lieu de transmettre cette chaleur le plus possible au fluide. Pour ce faire, il importe que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre: 300 - aluminium: 200 - acier: 60). Plus le coefficient de conduction est faible et plus la plaque doit être épaisse, ce qui augmente le prix, le poids et l'inertie de l'absorbeur.

- le système de refroidissement par le fluide caloporteur

Quel que soit le système, le contact entre les tuyaux véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime: soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement entre les tuyaux devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tuyau, de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés (des formules de calcul existent à ce sujet dans les ouvrages spécialisés). Les tuyaux de circulation du fluide en contact avec l'absorbeur seront de préférence placés en parallèle plutôt qu'en serpentin.



- L'isolation et le vitrage

Le capteur devant recevoir le rayonnement solaire, il est nécessairement en contact avec le milieu extérieur dont les conditions de température et de climat risquent de perturber considérablement son bon fonctionnement.

Des capteurs nus, c'est-à-dire sans vitrage et sans isolation, sont cependant commercialisés pour le chauffage des piscines. Ce type de capteurs ne peut fonctionner, en Belgique, que lorsque l'ensoleillement est important, la température extérieure est élevée et le vent quasi nul, ce qui limite leur utilisation exclusivement aux mois d'été.

Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale, mais il faut veiller à leur tenue à la température car une coupure de circulation peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150C en été.

Vers l'avant, comme le rayonnement solaire doit arriver par l'absorbeur, on ne peut utiliser que des matériaux transparents: verre en simple ou double vitrage, trempé ou non, armé ou non, ou certains matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser l'effet de serre (c'est le cas de matériaux comme le polycarbonate, le métacrylate et le tedlar). Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs surtout utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 150C).



- o les transferts d'énergie

L'énergie captée par le collecteur solaire et transformée en chaleur est cédée au fluide caloporteur et transférée vers un réservoir de stockage d'énergie.

Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée.

- Transfert par circulation naturelle de l'eau

Dans ces installations, le transfert d'énergie est basé sur la plus faible densité de l'eau chaude qui confère à celle-ci un mouvement ascendant.

- Système direct avec thermocirculation et appoint dans le stockage

L'eau entrant par le bas du capteur est échauffée par l'ensoleillement et sort en partie haute pour rejoindre le ballon de stockage situé à au moins 60 cm au-dessus du capteur. Un appoint (résistance électrique ou apport quelconque de chaleur via un échangeur) est intégré dans la partie supérieure du stockage alors que l'eau chaude solaire en occupe la partie basse.

Lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement, seule l'eau située dans la partie supérieure du ballon est chauffée par l'appoint. Ceci évite de chauffer toute l'eau à condition qu'il y ait une stratification des couches en fonction de la température. Cette stratification existe dans les ballons bien conçus: l'eau chaude se trouve en partie supérieure et l'eau froide en bas.

Lorsque le capteur est échauffé par le soleil, le fluide caloporteur, c'est-à-dire l'eau sanitaire dans ce cas, se met en mouvement pour rejoindre le ballon. Ce dernier se vide à sa base d'une quantité correspondante d'eau froide qui retourne au capteur. En cas d'utilisation d'eau sanitaire, l'eau chauffée par le soleil va monter de la partie inférieure du ballon à la partie supérieure. Si ce système est simple et donc peu coûteux, il présente en revanche quelques inconvénients:

- une bonne stratification dans le ballon est souvent difficile à réaliser ce qui a pour conséquence qu'une grande partie du stockage est chauffée par l'appoint réduisant la contribution de l'énergie solaire;
- de plus, ce système ne peut être utilisé en cas de gel et doit même être purgé; à l'opposé, en cas de fort ensoleillement, la température peut fortement augmenter dans le ballon ce qui implique de prendre certaines précautions;
- le tracé de l'installation doit être aussi simple que possible pour réduire au maximum les pertes de charge dans le circuit (pas de pente inversée ni de point haut, peu de coudes,...).



- Système indirect avec thermocirculation et appoint hors du stockage

Dans ce cas, il a deux circuits: l'un dit "primaire" contient l'eau qui est échauffée dans le capteur tandis que le circuit "secondaire" est alimenté par l'eau sanitaire à réchauffer.

Le transfert de chaleur se fait par un échangeur situé dans le ballon. L'appoint est située en dehors du stockage. Comme la circulation n'est pas forcée, on veillera, comme dans le système précédent, à placer le bas du ballon au moins 60 cm au-dessus du haut du capteur et à simplifier au maximum le circuit de canalisations. Le double circuit a l'avantage d'éviter la purge du système en cas de gel.

Le placement de l'appoint à l'extérieur de ballon permet au capteur de fonctionner librement sans que l'apport réalisé par l'appoint devienne excessif. Par contre, ce type d'installation est plus coûteux et la présence de l'échangeur nécessite que le capteur travaille à plus haute température ce qui diminue son rendement.

- Transfert par circulation forcée

L'installation utilise ici, en plus des éléments utilisés dans les systèmes précédents, une pompe de circulation commandée par une régulation de température.

Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le réservoir de stockage. L'utilisation de cette pompe permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs n'est pas plus chaude que celle contenue dans le réservoir.

C'est le rôle de la régulation de comparer les deux températures (à la sortie du capteur solaire et dans le réservoir de stockage) et de commander la pompe de circulation uniquement lorsque la première température est supérieure à la deuxième. En pratique, les régulateurs disponibles sur le marché permettent à l'utilisateur de fixer indépendamment la différence de température à l'enclenchement (entre 5 et 10C) et au déclenchement du circulateur (entre 2 et 5C).

Sous les climats à ensoleillement variable, ces systèmes donnent de meilleurs performances. Ils sont donc à conseiller pour une utilisation en Belgique. Par contre, sous des climats à ensoleillement constant, les systèmes à thermocirculation offrent des performances équivalentes, et seront plutôt conseillés pour leur prix plus faible, leur coût de fonctionnement nul et une meilleure fiabilité.

Il faut encore signaler deux remarques non négligeables:

- sous les climats tempérés, comme le nôtre en Belgique, il est indispensable que l'installation soit pourvue d'une protection contre le gel des absorbeurs: soit un système de drainage automatique qui vide les absorbeurs lorsque la pompe de circulation ne fonctionne pas, soit un produit antigel mélangé à l'eau du circuit primaire.
- certains circuits d'eau sanitaire imposent de limiter la température de l'eau chaude à 60C, l'idéal étant qu'une telle limitation soit placée en aval de l'installation solaire de façon à maximaliser les apports de celle-ci; lorsqu'une telle limitation de température est placée dans le réservoir de stockage solaire, il y a risque de surchauffe des absorbeurs en été, qui doivent dès lors être conçus en conséquence.



- Le stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie est une exigence fondamentale de pratiquement tout système solaire actif. Ce stockage peut se faire sous forme thermique ou chimique.

Les systèmes de stockage sont classifiés comme suit:

- systèmes de stockage thermique dont:
 - stockage sous la forme de chaleur sensible;
 - stockage basé sur la chaleur latente d'un changement de phase du matériau de stockage;
- systèmes de stockage chimique

On peut concevoir les systèmes de stockage à court terme ou à long terme, qui se différencient essentiellement par la taille du système de stockage. Le stockage à long terme (par exemple, le stockage inter-saisonnier) est rarement rentable.

Dans le cas du stockage sous forme de chaleur sensible, une matière (le plus souvent de l'eau, des pierres ou une huile thermique) est portée à une température plus élevée chaque fois qu'il se produit un excédent de chaleur, et refroidie lorsque nécessaire. Dans ces systèmes, on a toujours besoin d'un réservoir et aussi le plus souvent d'une surface d'échange. Le prix de revient de ces éléments est généralement le facteur qui limite son application économique.

Le stockage de chaleur à base de chaleur latente peut se faire à l'aide d'une matière qui passe d'une phase à une autre (par exemple solide-liquide) et exige pour ce faire un grand apport de chaleur dans un sens, tandis que la transformation inverse libère une grande quantité de chaleur. Si on choisit avec soin la température de fusion de la matière utilisée, la capacité thermique d'un stock à changement de phase par unité de volume peut être sensiblement plus élevée que dans les systèmes de stockage à eau ou à lit de pierres.

Par stockage chimique, on entend les systèmes où un élément est décomposé sous l'effet d'un apport de chaleur, après quoi les produits de la réaction sont séparés puis stockés ce qui en principe ne pose aucune limite dans le temps. Pour rendre l'énergie à nouveau disponible, il suffit de faire réagir les produits de la décomposition pour reconstituer les éléments originaux suivant une réaction exothermique. Ces systèmes en sont encore actuellement au stade de la recherche.



- **Avantages et limites**

(extrait du ["Guide des Energies Renouvelables"](#) (MRW))

Avantages

L'utilisation thermique de l'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses avantages propres, à savoir:

- Les technologies à mettre en oeuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les Régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'oeuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.
- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.



Limites

L'énergie solaire thermique active a toutefois certaines limites:

- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.
- C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).



• Principales applications

(extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW))

- Le chauffage des piscines est l'application la plus simple de l'énergie solaire thermique active. Dans ces systèmes, la piscine elle-même forme le système de stockage. Le plus souvent, l'eau de la piscine circule directement dans les collecteurs, qui sont parfois des collecteurs nus.

Pour les systèmes de plus grande taille, on utilise également des collecteurs à revêtement transparent

- La production d'eau chaude sanitaire est peut-être l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. Dans ces systèmes, on peut utiliser aussi bien la circulation naturelle (thermosiphon) que la circulation forcée (pompes de circulation), de diverses configurations. En Europe, selon le climat, environ 40 à 70% des besoins énergétiques annuels peuvent être satisfaits par les collecteurs solaires, de sorte qu'un chauffage d'appoint est toujours nécessaire
- Le chauffage des locaux peut se faire avec des collecteurs à eau ou à air. Les systèmes peuvent être simples ou relativement complexes. On peut utiliser aussi bien le stockage inter-saisonnier que le stockage à court terme. Les systèmes sont pour la plupart développés pour satisfaire uniquement à une partie de la demande de chaleur. En Belgique, étant donné

le climat, un système qui couvrirait totalement les besoins est pratiquement impossible à réaliser. L'idéal est de coupler l'installation solaire avec une installation de distribution de la chaleur à basse température dans l'habitation.

- Une utilisation qui pourrait intéresser certains pays en voie de développement est la production d'eau douce par distillation solaire.



- **Réalisations**

(extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW))

- [le boiler solaire](#)
- **Piscines du Complexe sportif du Blocry à Louvain-la-Neuve (B)**

350 m² de capteurs solaires placés en toiture y chauffent l'eau de deux piscines et des douches depuis 1984. Le gain en CO₂ est estimé à 93 tonnes/an, l'apport moyen d'énergie à 98 331 kWh/an, l'économie de gaz de 49 182 m³/an. Malheureusement, il y a un surcoût électrique de 2 577 kWh/an.
- **Une maison chauffée par le soleil à Marche-en-Famenne (B)**

Les capteurs solaires constituent ici ce que l'on appelle une toiture solaire intégrée puisque c'est un pan complet de toiture qui est couvert des 45 m² utiles de capteurs solaires. Ceux-ci sont constitués d'absorbeur à surface sélective et recouverts de panneaux en polycarbonate. La distribution de la chaleur dans la maison se fait à basse température dans le sol. L'appoint est assuré par un poêle à bois. La couverture solaire atteint 75% des besoins, besoins qui ne sont cependant pas très élevés, la surface plancher étant de 100 m² et les parois bien isolées (8 cm de polystyrène extrudé dans les murs et 12 cm de laine de verre en toiture). L'installation fonctionne avec satisfaction depuis l'hiver 84-85.
- **77 m² de chauffe-eau solaires à la maison de repos La Charmille - Gembloux (B)**

Depuis mai 2003, la Maison de repos La Charmille, géré du CPAS de Gembloux, possède 77 m² de panneaux solaires pour le chauffage de l'eau sanitaire couplés à un ballon

accumulateur de 3.000 litres. Ce système permettrait de couvrir 62% des besoins énergétiques nécessaires aux 730 m³ d'eau chaude annuels, soit une économie de combustible de 4.500 euros et 9 tonnes de CO₂ par an.

Subsidié à 30%, le temps de retour de l'investissement serait de 11 ans.

- **Un laboratoire cinématographique chauffe ses bains avec des capteurs en Région Parisienne**

Les laboratoires Neyrac Films, spécialisés dans le traitement des films cinématographiques 16 mm, utilisent pour le rinçage des films, lors de leur développement, d'importantes quantités d'eau chaude à une température de 20 à 40C selon le procédé. Jusqu'alors produits par des chaudières à fuel domestique, les 1.500.000 kcal quotidiennes sont maintenant fournies pour une partie par un récupérateur placé sur les eaux de rejet et pour une autre partie par une installation solaire. L'appoint continue à être fourni par des chaudières à fuel domestique.

L'installation solaire est constituée de 250 m² de capteurs à revêtement sélectif et une seule vitre; sa puissance instantanée peut atteindre 175 kW. Le circuit solaire où circule un mélange eau-antigel est couplé au circuit d'eau industrielle par un échangeur à plaques. Le stockage est constitué de 2 ballons en parallèle de 10 m³, isolés thermiquement avec 6 cm de laine de verre.

L'ensemble de l'opération (récupérateur compris) a coûté près de 2,6 millions de FB. L'économie de combustible atteint 38.000 litres dont plus de 20.000 pour le système solaire.

Cette installation exemplaire devrait inspirer d'autres entreprises utilisant de grandes quantités d'eau chaude à basse température, même dans des régions moyennement ensoleillées.

- **Le plancher solaire direct**

Une technique récente, déjà bien expérimentée dans la Région Rhône - Alpes en France.

Apparu dans le Sud de la France il y a une dizaine d'années, le Plancher Solaire Direct (PSD) est issu de travaux menés par l'Ecole Supérieure d'Ingénieur de Marseille. Il résulte d'une simplification très importante des techniques de chauffage solaire actif utilisées jusqu'alors.

Le fluide chauffé par les capteurs solaires circule directement dans un plancher sans passer par un réservoir de stockage. La masse de béton de sol assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé.

Raccordés à une distribution basse température, les capteurs travaillent avec un meilleur rendement, étant donné que toutes les pertes intermédiaires (échangeurs, stock) qui existaient auparavant sont supprimées. La chaleur solaire est utilisée également pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire en mi-saison et sa production complète en été.

La productivité des capteurs atteint des valeurs de 400 à 450 kWh/m² par an dans la Région Rhône-Alpes, région caractérisée par une période de chauffe relativement longue et par un ensoleillement généreux.

Depuis 1985, plus de 70 installations en maison individuelle ont été réalisées dans la Région, ainsi qu'une dizaine d'équipements collectifs. Ces réalisations totalisent près de 2.600 m² de surface de capteurs solaires installés, réparties de façon égale entre les bâtiments collectifs et individuels.



Pour en savoir plus:

- **Personnes-ressource et associations**

Ateliers de la Rue Voot

Jean Motllo

Construction de capteurs solaires

(atelier de techniques solaire et d'énergie douce: chaque mardi de 18 à 22h. et samedi de 9h.30 à 13h.)

91, r. Voot

B-1200 Bruxelles

Tel : +32 2 762 48 93 Fax : 779 01 05

- **Centres de démonstration**

Four solaire

F-66210 Mont-Louis

Tél.: +33 (0)4 68 04 14 89

Four d'Odeillo

Association "Plus fort que 10 000 soleils"

Tél.: +33 (0)4 68 30 77 86

- **Liens sur la "toile"**

[case studies](#) - [solar thermal](#) - [Soltherm](#)

- **Liens dans Ecotopie**

[solaire](#) - [énergie photovoltaïque](#) - [énergies renouvelables \(infos générales\)](#)



- **Bibliographie**

(extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW))

Anonyme (1978).

Energie solaire: conversion et applications.

Colloque de Cargèse, Edit du CNRS, Paris, France.

Anonyme (1982).

Le stockage thermo-chimique de l'énergie solaire.

Colloque, Domaine Provincial, Hélécin, Belgique.

Anonyme (1983).

Guide de la France solaire.

Comité d'Action pour le solaire, Paris, France.

Anonyme (1983).

Systèmes de chauffage solaire à collecteurs à eau.

Programme national R&D Energie. Services de programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, Belgique.

Anonyme (1991).

Energies renouvelables et développement local.

Rencontres européennes de Toulouse, Comité de liaison des Energies Renouvelables (CLER), Paris, France.

Beckman, W. et al. (1977).

Solar heating design by the chart method.

John Wiley Edit, New-York, US.

Bernard, R. et al. (1979).

Le rayonnement solaire: conversion thermique et applications.

Edit Technique et Documentation, Paris, France.

Bruckert, R. (1980).

Le soleil pour tous.

Edit du Signal, Lausanne, Suisse.

Chanliagnet, Ch. et al. (1977).

L'Energie solaire dans le bâtiment.

Eyrolle, Paris, France.

Chareyre, R. (1980).
La maison autonome n 2.
Edit Alternatives, Paris, France

Chateauminois, M. et al. (1979).
Calcul d'installations solaires à eau.
Edisud/Pyc Edit, Aix-en-Provence/Paris, France.

Chateauminois, M. et al. (1981).
Eau chaude solaire: guide de l'installateur.
Edisud, Aix-en-Provence/Paris, France.

Corre, A. (1981).
Energie solaire - Effets thermiques: sélection de brevets.
Edit Technique et Documentation, Paris, France.

Delbaere, R. et Gillet, I. (1981).
Pour une civilisation du soleil.
Edit JEB, Bruxelles, Belgique.

Dogniaux, R. et Lemoine, M. (1976).
Programme de calcul des éclairagements solaires énergétiques et lumineux de surfaces orientées et inclinées.
IRM, Bruxelles, Belgique.

Dogniaux, R. (1993).
Exposition énergétiques par ciel serein des parois orientées et inclinées.
IRM, Bruxelles, Belgique.

Duffie, J.W., Beckman, W. et Wiley, J. (1974).
Solar Energy thermal Processes.
New York, US.

Ferraro, R. et al. (1983).
Performance monitoring of solar heating systems in dwellings.
CEE, Bruxelles, Belgique.

Grallet, P. et al. (1980).
Physique des convertisseurs héliothermiques.
Edisud, Aix-en-Provence, France.

Groday, R. et al., (1983).
Solar space heating: an analysis of design and performance from 33 systems.
CEE, Bruxelles, Belgique.

Maillardet, T. et Vieillard, J.-M. (1981).
L'indépendance énergétique de la maison.
Eyrolles, Paris, France.

Ménard, J.-P. (1980).
Maisons solaires: premiers bilans.
Edit du Moniteur, Paris, France.

Morel, H.-J.-F. (1978).
Savoir acheter, savoir utiliser l'énergie solaire.
Auteur-éditeur, Villardonnell.

Perrin de Brichambaut, Ch. et Vauge, Ch. (1981).
Le gisement solaire: évaluation de la ressource énergétique.
Edit Technique et Documentation, Paris, France.

Sfeir, A. et Guarracino, G. (1981).
Ingénierie des systèmes solaires: applications à l'habitat.
Edit Technique et Documentation, Paris, France.

Vauge, Ch. (1979).
Le choix solaire.
Edit du CNRS, Paris, France.

Watson, D. (1979).
Le livre des maisons solaires.
Edit l'Étincelle, Québec, Canada.



Paul De Neyer, mars 2005.
Présentation et logogrammes solaires adaptés pour le Web par [Axelle Bartholomeus](#)

Écologie [Accueil](#)



Energie photovoltaïque

© MRW

Sources techniques principales:
extraits des chapitres "L'énergie photovoltaïque" et "Les Installations photovoltaïques", rédigés par Taric de Villers (Energie Nouvelle et Environnement) pour le ["Guide des Energies Renouvelables"](#), édité par le Ministère de la Région Wallonne (courtoisie du Ministère de la Région Wallonne (MRW)).



Façade photovoltaïque de la bibliothèque de Mataró (Catalunya)

Architecte : Miquel Brullet

Photographie : Paul De Neyer 2005

... Menu ...

Qu'est-ce ?	En détail	Pour en savoir plus:
<ul style="list-style-type: none"> • En bref 	<ul style="list-style-type: none"> • Historique • Situation contemporaine • Principe de fonctionnement • Systèmes photovoltaïques • Avantages et inconvénients • Secteurs d'applications • Réalizations 	<ul style="list-style-type: none"> • Personnes-ressource et associations • Liens sur la "toile" • Liens dans Ecotopie • Bibliographie • Périodiques

Qu'est-ce ?

- **En bref :**

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité.

En détail

- **Historique**

(extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW))

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années septante pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.



- **Situation contemporaine**

La technologie photovoltaïque est en plein essor. Aux quatre coins du monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont étudiées puis expérimentées dans l'espoir d'une commercialisation future.

Toutefois, les prévisions de baisse des prix des modules photovoltaïques ont été trop optimistes et l'industrie photovoltaïque se trouve dans une situation difficile. En effet, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production trop faibles entraînent des coûts élevés qui freinent le volume des ventes.

On peut espérer que, dans les années à venir, la technologie photovoltaïque arrive à "maturité" (procédés simplifiés, meilleurs rendements de production) et qu'alors l'augmentation du volume de production réduise le coût des modules.

En dépit de ces difficultés, l'évolution de la technologie et du marché photovoltaïques est globalement positive. Les méthodes de fabrication se sont améliorées réduisant les coûts de production et les volumes de production ont été augmentés dans l'espoir de réduire les coûts. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 Mégawatts-crête (MWc) en 1982 à 60 MWc en 1992. La croissance du marché photovoltaïque pour 1992 a été de +10% en moyenne, l'Europe ayant pu maintenir un taux de croissance élevé de +25 à +30%, alors que les taux aux Etats-Unis et au Japon étaient respectivement de +7% et de -5%.

Actuellement, 90% de la production totale de modules se fait au Japon, aux EU et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies, Siemens, Sanyo, Kyocera, Solarex et BP Solar, qui détiennent 50% du marché mondial. Le solde de 10% de la production est fourni par le Brésil, l'Inde et la Chine qui sont les principaux producteurs de modules dans les pays en voie de développement. Les applications photovoltaïques se répartissent de manière égale entre les pays industrialisés du nord et les pays dits en voie de développement. Il est toutefois difficile d'établir des prévisions pour cette fin de siècle: suivant les sources, l'estimation de la capacité de production va de 100 à 1.000 MWc par an.



- **Principes de fonctionnement**

La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Le semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande

de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap", E_g , en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons - particules de lumière - en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique, E , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles:

Le dopage de type n (négatif) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

Le dopage de type p (positif) utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie du band gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée.



- **Systemes photovoltaïques**

(extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW))

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de

puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation (charge ou load).



- **Avantages et inconvénients**

(extrait du ["Guide des Energies Renouvelables"](#) (MRW))

Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par

l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.



- **Secteurs d'applications**

(extrait du ["Guide des Energies Renouvelables"](#) (MRW))

- domaine spatial
- habitation isolée
- industrie isolée
- centrale de puissance
- résidence urbaine
- biens de consommation
- Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

Le spectre du rayonnement solaire étant différent en dehors de l'atmosphère, on utilise pour les cellules et les modules spatiaux d'autres matériaux plus sensibles dans les ultra-violets et plus résistants aux

rayonnements et aux bombardements divers (UV, électrons, protons, ions, oxygène atomique, micro-météoroides,...). L'arséniure de gallium (AsGa), le phosphore d'indium (InP) et le tellurure de cadmium (CdTe) sont les semi-conducteurs les plus prometteurs pour réaliser ces objectifs.

o Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité. Bien que la solution des groupes électrogènes (Diesel) présente beaucoup d'inconvénients (peu fiables, peu autonomes, coûts cachés pour le combustible, les réparations et l'entretien), ils ont souvent été choisis pour leur coût d'investissement modéré. En effet, le coût initial élevé d'un générateur photovoltaïque est l'obstacle majeur à son expansion sur ce type de marché, en particulier dans les pays en voie de développement où les taux d'intérêt sont souvent très élevés.

Les dizaines de milliers d'unités photovoltaïques autonomes (au silicium cristallin ou amorphe) installées de par le monde ont pourtant démontré leur compétitivité en ce qui concerne de multiples applications de petite et moyenne puissance (inférieur à 100 kW).

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

- le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation,
- la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...,
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...)

o Industrie isolée

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...). Le débat reste ouvert quant au choix d'un système photovoltaïque centralisé (avec un générateur photovoltaïque unique pour un ensemble d'utilisateurs dispersés) ou décentralisé (petits générateurs photovoltaïques pour chaque consommateur). Le choix dépendra d'abord de la densité de l'habitat et ensuite du mode de financement possible (pouvoir d'achat du consommateur, aide de banques locales, aide internationale,...).

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations-relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que:

- protection cathodique,
- systèmes silencieux ou sans vibration,
- éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- équipement de monitoring,
- télémétrie, etc.

o Centrale de puissance

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe (44 kW en Allemagne, 300 kW en Grèce, 340 kW en Corse), aux Etats-Unis (1 MW à Lugo, 8 MW à Carissa Plain) et au Japon (1 MW à Saijo), mais elles n'ont pas encore dépassé le stade pilote.

La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct.

Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques.

Par exemple, aux extrémités d'un réseau, la qualité de la puissance se détériore lorsque la demande en électricité augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas dans le sud des E.U. où la demande est maximum aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.

Une autre application intéressante dans ce secteur est la combinaison hydro-photovoltaïque pour des centrales au fil de l'eau (0,1 à 10 MW). L'apport énergétique du système photovoltaïque complète idéalement le creux saisonnier de certains cours d'eau, et la variation de la production sur l'année est atténuée. Cette application pourrait être développée dans nos régions dans un futur proche.

- Résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

Les premières réalisations datent de la fin des années 70 aux Etats-Unis, mais ce n'est que depuis quelques années que l'Europe s'est lancée dans un programme d'expérimentation de maisons photovoltaïques (2 à 3 kWc par toit), en particulier en Suisse et en Allemagne où la politique de protection de l'environnement est sévère.

L'intérêt de telles réalisations est de produire de la puissance à l'endroit même de la demande, en s'affranchissant des problèmes du stockage. L'excès de production est injecté dans le réseau, et en période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens. L'enjeu est important mais la rentabilité est très faible, même si le Wc coûte moins cher qu'en région isolée. En Europe, la demande domestique en électricité est généralement déphasée par rapport à la contribution du photovoltaïque, la pointe se situant le soir.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux E.U.; le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux - où la consommation est essentiellement diurne - correspond mieux aux heures d'ensoleillement. L'orientation verticale (ou quasi) peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver. Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques.

- Biens de consommation

L'électronique moderne requiert de très petites puissances - du milliWatt à la dizaine de Watt - de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination

de l'environnement par les métaux lourds principalement. Le Japon est le principal producteur et consommateur de ces articles.



- Réalisations

- Pour se déplacer

- [les avions solaires](#)
- [les voitures solaires](#)
- le catamaran solaire [Global Green Cat](#) de Karen Howarth

Tel + Fax : +44 181 969 0470

E-Mail .: global@greencat.co.uk

Voir Planetary Connections numéro 9 01/02/1996

- "Malt's Mermaid"



Photo: Internet

Le "kayak" solaire du Japonais Kenichi Horie, âgé de 56 ans, est recouvert de cellules photovoltaïques pouvant générer 1,5 kW. Une batterie nickel-hydrogène alimente le moteur du bateau et une autre le frigo, une radio, l'éclairage et un enregistreur vidéo. La coque en alu est faite, partiellement, de 27 000 canettes de bière recyclées (le mécène du voyage est un marchand de bière!). Parti du port de Salinas (Ecuador) le 20 mars 1996, il rejoignit le port de Tokyo au début août de la même année.

○ Pour communiquer

- studio solaire de Greenpeace

(voir "[Systèmes Solaires](#)" numéro 2 de 1994)

- bornes téléphoniques autonomes, le long de l'autoroute Bruxelles-Paris (après la frontière française)
- User Information Post

(communiqué par Jean-Pierre ALVIN de la STIB)
(Projet CEE "Phoebus") de la STIB, conçu pour informer les voyageurs aux arrêts d'autobus. Unité indépendante alimentée par une batterie qui est connectée soit à un panneau solaire soit au secteur. L'information affichée est reçue via une liaison Radio Data System.

○ Eclairage public

Belgique

Bruxelles: le long du stade Baudouin au Heysel.

España

Huit localités du Maresme (Catalunya): Villasar de Mar (plaça Marti, plaça Ventura Gassol et le Pas de Laia), Alella (passeig de Can Coll), Teià (zone du Castell), Calella (les Torretes), Vilassar de Dalt (six maisons isolées alimentées par une petite centrale), El Masnou (passeig maritime), Premià de Mar (une place) et Palafolls (le cimetière!).

Portugal

Castro D'Aire.

○ Centrales photovoltaïques

- **Suisse**
 - **Mont-Soleil** (ça ne s'invente pas!)

Dans le Jura à 1250 m. d'altitude. 400 m² de cellules photovoltaïques monocristallines au silicium collées sur des panneaux fixes. Produit 0,5 MW en pointe. Coût: 30 millions de FF. Prix estimé du KWh: 3FF. (d'après Alain Douard dans "Nature et Progrès" France 09/10 1992)

- **Deutschland**
 - **Neunborg Vorm Wald** (Bayern)

- **España**
 - **Toledo**

voir "Réalités de l'écologie" 05/95 p.37

- **Italia**
 - Vasto (Abruzzi): 1 MW.

- **Maroc**
 - Programme Pilote d'Electrification Rurale solaire (PPER):

Ce plan, engagé en 1987, concerne 240 villages isolés.



Pour en savoir plus:

- **Personnes-ressource et associations**

Association française des activités sportives solaires (AFASS)

Organisateur du championnat européen des bateaux solaires

à La Rochelle en juillet 1996

F. Berthet

133, r. Michel-Ange

Tél.+ fax: +33 (1) 40 71 63 72



Energie hydraulique

Sources techniques principales:
extraits des chapitres "L'énergie hydroélectrique" et "Les microcentrales hydroélectriques"
rédigés par
Thierry Bertouille (Inter-Environnement Wallonie) pour le
["Guide des Energies Renouvelables"](#), édité par le Ministère de Région Wallonne (courtoisie du
Ministère de la Région Wallonne (MRW)).

... [Menu](#) ...

Qu'est-ce ?

- [En bref](#)

En détail

- [Historique](#)
- [Une installation hydroélectrique type](#)
- [Avantages et limites des microcentrales](#)
- [L'énergie marémotrice](#)
- [Turbines et roues à aube](#)
- [Situation contemporaine](#)
- [Moulins](#)

Pour en savoir plus:

- [Personnes-ressource et associations](#)
- [Liens sur la "toile"](#)
- [Liens dans Ecotopie](#)
- [Bibliographie](#)
- [Périodiques](#)

Qu'est-ce ?

[En bref](#) :

L'énergie hydraulique résulte du mouvement de masses d'eau coulant le long des pentes naturelles.

Pour pouvoir transformer cette énergie en travail utile, il est nécessaire de la concentrer, soit en tirant parti de chutes naturelles, soit par l'aménagement

d'un barrage de manière à obtenir une hauteur de chute et un débit suffisant pour installer une centrale.

[... Menu ...](#)

En détail

- **Historique**

Sources principales:

- Sigvard Strandh, "Machines, histoire illustrée", Draeger, Paris 1979.
- Jean Gimpel, "Le Moyen Age pour quoi faire?", Stock 1986, pages 96 à 108.

Ordre d'apparition des machines hydrauliques: la roue à palettes, la roue horizontale, la roue verticale avec engrenages (la roue en dessous, la roue de côté et la roue en dessus), les moulins flottants, les moulins à marée, puis, en fin, les turbines.

La roue à palettes: cette roue dont le périmètre est garni de palettes et godets servait à élever l'eau, les palettes plongeant dans la rivière permettant le mouvement de la roue.

La roue horizontale: cette roue, entièrement immergée dans la rivière, est fixée à un arbre vertical avec, à l'autre extrémité, une meule. Ces moulins étaient, donc, exclusivement, dédiés à la mouture de grains. Ils apparaissent au premier siècle ACN (dans le Croissant fertile?).

La roue verticale: apparait dans les premières décennies de cette ère. Moulin de Barbegal (Arles): au quatrième siècle, les Romains y érigent un complexe de huit paires de roues en dessus (2,2 m de diamètre et 0,7 de large). L'eau était captée dans l'Arcoule par un aqueduc de 2 m de largeur et 5,6 m de profondeur. A Barbegal, l'aqueduc est incliné à 30 degrés. Chaque roue entraînant une paire de meules, on a estimé la production de 2,8 tonnes de farines par jour, la plus grande partie embarquée dans le port d'Arles et exportée vers Rome.

Invention de l'arbre à cames au Moyen Age: dès lors, les roues hydrauliques pourront actionner d'autres machines que les meules et mécaniser les manufactures. La came va permettre d'écraser mécaniquement le chanvre (matière première du papier et textile), fouler les draps, marteler le fer, scier les grumes, broyer les minéraux, actionner des soufflets,...

1086: le grand cadastre dans le Domesday Book (Livre du Jugement Dernier) recense 5 624 moulins en Angleterre, soit, selon Lewis Mumford, un moulin pour 400 habitants.

1276: premières mentions de moulins à papier mus par l'énergie hydraulique à Fabriano (I). D'autres sont en fonctionnement en 1280 à Xativa (Valencia, E). Vers 1300, ils apparaissent en France. Le moulin Richard-de-Bas date de 1326. 1848: en France, on dénombre 22 500 moulins à eau (dont 17 300 pour le blé) contre 5 200 machines à vapeur.

Début du 20^e siècle: introduction, en Afrique orientale, de moulins par les coolies indiens venus construire le chemin de fer de Mombassa en Ouganda.

Malgré un rendement très faible (un demi CV, soit entre 3 et 400 W!), les roues hydrauliques furent utilisées pendant près de deux millénaires.

Les moulins flottants: ils auraient été inventés, en 537, lors du siège de Roma par les Goths. Ceux-ci ayant coupé l'alimentation en eau par les aqueducs et presque tous les moulins romains étant mus par l'eau des aqueducs, le défenseur de la ville, le général byzantin Bélisaire, imagina d'installer des moulins à roues à aubes sur le Tibre, pour assurer l'alimentation de farine de la ville.

Quelques siècles plus tard, on pouvait voir des moulins flottants à Venizia et à Bagdad. Au douzième, on en construisit trois sous les arches du Grand Pont de Paris. Au dix-huitième, on pouvait encore voir à Köln, plusieurs exemplaires de ceux qui avaient été installés au quinzième siècle sur le Rhein.

Les moulins à marée: on en construisit un, en 1130, près de l'embouchure de l'Adour (F). Un siècle plus tard, on en vit plusieurs près de Venezia. Ce n'est qu'au 20^e siècle que l'énergie marémotrice sera utilisée industriellement avec la centrale de l'estuaire de la Rance (Bretagne).

Les turbines hydrauliques:

- **La turbine Fourneyron:** en France, en 1826, l'ingénieur Benoît Fourneyron remporta le prix de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale pour le meilleur dessin d'une roue hydraulique industrielle. Sa machine, appelée turbine (mot inventé par son concurrent Charles Bourdin, du latin *turbo*), était faite de deux roues horizontales concentriques: une roue intérieure fixe et munie d'aubes directrices incurvées dirigeant l'eau contre les aubes de la roue extérieure mobile (rotor). On annonçait un rendement d'au moins 80 %! Néanmoins, à certaines vitesses, des turbulences se produisaient lorsque l'eau quittait les aubes directrices.

La première turbine Fourneyron fut installée vers 1835 à Saint-Blaise (Forêt Noire).

- **La turbine Francis:** turbine où la roue intérieure est mobile. Ce système proposé par le Français Jean Poncelet fin des années 1820, fut breveté par le Nord-américain Samuel B. Howd en 1838 et popularisé par James B. Francis. Dans les années 1860, cette turbine commença à supplanter la roue hydraulique.
- **La turbine Pelton:** conçue par l'ingénieur des mines en Californie, Lester A. Pelton, dans les années 1870. Celui-ci avait observé l'accélération, jusqu'à l'éclatement, d'une roue hydraulique à aubes incurvées frappée, accidentellement, par

un jet d'eau. Pelton vint à la conclusion qu'on pouvait mieux exploiter la puissance d'un jet en inversant la direction avec l'aube. Il redessina l'aube en y créant deux poches accolées formant une arête médiane dans l'auge divisant ainsi le jet en deux et le déviant complètement. Cette turbine convient particulièrement aux hautes chutes à débit modéré ou faible. Sa fabrication industrielle commença dans les années 1880.

- **La turbine Kaplan:** en 1910, l'Autrichien Victor Kaplan propose une turbine répondant au rendement médiocre de la turbine Francis dans le cas de faibles charges. Cette turbine à axe vertical et à rotor en hélice avait des aubes à pas variable.

La première turbine Kaplan fut installée, en 1919, dans une usine textile de Velm (Osterreich). Sa puissance était de 25,8 ch pour une hauteur de chute de 2,3 m. Jusque 1926, le développement des turbines Kaplan fut arrêté par un phénomène de cavitation (en raison de la rotation rapide de l'hélice dans l'eau, une zone de basse pression se crée sous la surface d'aspiration de l'aube, ce qui peut amener l'eau à ébullition, puis la corrosion de la surface des aubes à la condensation des bulles de vapeur). En 1926, une société suédoise résout le problème en créant une servo-direction à commande hydraulique pour la rotation des aubes du rotor. Cette même année fut installée, à Lilla Edet (Sverige), une turbine au rotor de 5,8 m de diamètre et dont la puissance atteignait 10 000 ch pour une hauteur de chute de 6,5 m. Les turbines Kaplan conviennent particulièrement aux faibles hauteurs de chute et forts débits.

- La turbine à bulbe: variante de la turbine Kaplan où le rotor est placé dans une enveloppe fuselée installée horizontalement dans le tunnel de la centrale. La première a été conçue en Allemagne dans les années 1940.

L'usine marémotrice de la Rance (F) compte 24 groupes-bulbes réversibles de 10 MW.

- **Une installation hydroélectrique type**

extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW)

Eléments:

- Ouvrage de prise d'eau

La prise d'eau est constituée par une dérivation dont l'entrée est limitée par un seuil et qui dirige le débit ainsi dérivé vers le canal d'amenée. Le contrôle du débit s'effectue le plus souvent, soit par un barrage mobile dans la rivière, soit par une vanne dans le canal d'amenée.

- Canal d'amenée

Il relie la prise d'eau à l'entrée de la centrale. Il est habituellement en écoulement libre à ciel ouvert.

- Vannes batardeaux

Vannes d'isolation généralement rectangulaires, dont le fonctionnement est similaire à celui d'une guillotine, et qui permettent d'isoler la microcentrale de la rivière en cas de nécessité (entretien de l'installation, protection contre les crues,...)

- Grille et dégrilleur

La grille protège la turbine contre les corps charriés par la rivière, tandis que le dégrilleur, sorte de peigne ou de râteau, débarrasse la grille des éléments flottants accumulés.

- Conduite forcée ou chambre de mise en charge

La conduite forcée est un tuyau qui relie l'extrémité du canal d'amenée (au sommet de la pente) à la turbine (au pied de la pente). Elle supporte à son extrémité inférieure une pression de service voisine de la hauteur de chute. Dans certains cas, par exemple les anciennes turbines Francis à axe vertical, la conduite forcée est remplacée par une chambre de mise en charge.

- La turbine

La turbine transforme l'énergie de l'eau en énergie mécanique. La turbine a remplacé la roue à aubes qui était utilisée jusqu'au 19^{ème} siècle dans les moulins à eau. Le rendement d'une turbine (de l'ordre de 70%) est nettement supérieur à celui de la roue hydraulique (20%). Une turbine comprend des organes fixes, des organes de réglage et une partie mobile (roue). Les organes

fixes et de réglage ont pour rôle essentiel de diriger l'eau sur la roue dans les meilleures conditions possibles; la partie mobile est destinée à produire un couple moteur sur l'arbre en transformant en puissance mécanique la plus grande fraction possible de la puissance disponible.

- La régulation de vitesse

La régulation synchronise la vitesse de rotation de la turbine avec l'alternateur. Elle permet aussi le démarrage et l'arrêt de la turbine en actionnant le distributeur (voir plus loin).

- L'alternateur

L'alternateur permet de transformer l'énergie mécanique en électricité. Il comporte un induit fixe (stator) et un inducteur tournant (rotor). Les alternateurs peuvent être classifiés suivant l'excitation du rotor. En ce qui concerne l'alternateur synchrone, l'excitation est produite par une petite génératrice annexe qui produit un courant créant un champ magnétique dans le rotor. Dans le cas de l'alternateur asynchrone, la fréquence et le voltage du courant sont imposés par le réseau. Il n'y a pas d'excitation du rotor. Cet alternateur est plus simple et plus robuste mais n'est utilisable que lorsque la puissance de la microcentrale est largement inférieure à la puissance du réseau, c'est-à-dire de la charge, qu'il alimente.

- Réseau de transport et de distribution de l'électricité produit

L'énergie produite peut être autoconsommée par le producteur (éclairage, matériel électrique, chauffage) ou être revendue au réseau.

- Canal de restitution

Ce canal relie la sortie des turbines au lit du cours d'eau aménagé.

[... Menu ...](#)

- **Avantages et limites des microcentrales**

extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW)

- Les avantages:
 - La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables.
 - L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie.
 - L'entretien de l'installation est très simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques % de l'investissement).
 - Il s'agit bien entendu d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

- Les limites:
 - La production d'électricité d'une microcentrale est parfois caractérisée par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites.
 - Les coût d'investissement peuvent être assez importants pour certaines installations.
 - L'installation d'une microcentrale hydroélectrique nécessite des sites appropriés (cours d'eau et chute)

- Impacts négatifs sur l'environnement:

Une microcentrale mal intégrée dans son environnement, peut générer des perturbations de diverses natures.

- L'atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée.
- Le bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse, l'alternateur, du transformateur et l'écoulement de l'eau peu provoquer une gêne pour le voisinage proche.
- La prise d'eau peut entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières.
- Dans la partie court-circuitée de la rivière, une eutrophisation du milieu aquatique ainsi qu'une modification et une perturbation de la faune peuvent être observées.

- L'installation peut constituer un obstacle aux migrations des poissons.

- Solutions d'accompagnement

Cependant, si la microcentrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées.

- En assurant le respect du débit réservé.
- Par la mise en place de passes à poissons.
- En veillant à l'intégration de la microcentrale dans le paysage.
- En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants.

[... Menu ...](#)

- L'énergie marémotrice

extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW)

Les technologies hydroélectriques peuvent aussi tirer parti de l'énergie des marées, bien que dans ce cas, on ne peut plus dire qu'il s'agisse de microhydraulique.

Tout le monde connaît le phénomène de marée par lequel le niveau de la mer monte et descend environ toutes les 12 heures selon une amplitude variable dans le temps et dans l'espace. Ces variations de niveau provoquent la formation de courants périodiques, dits courants de marée.

Les marées sont provoquées par l'attraction exercée par le soleil et la lune sur les océans et sont de plus sensiblement influencées par la forme du relief des fonds marins (phénomène de résonance).

L'énergie hydraulique de la marée peut être transformée en énergie électrique au moyen d'un aménagement comprenant:

- un barrage en travers d'un estuaire ou formant une baie qui crée ainsi un bassin isolé dans lequel le niveau est différent de celui de la mer; ce barrage comporte des ouvertures dont l'obturation est commandée par des vannes et qui permettent d'établir une communication entre le bassin et la mer;

- une usine équipée de groupes turbo-alternateurs qui fonctionnent grâce à la différence de niveau existant entre le bassin et la mer.

L'énergie disponible, E , est proportionnelle à la surface du bassin et au carré de l'amplitude moyenne des marées, c'est-à-dire la différence de niveau entre une marée haute et une marée basse consécutive. Pour un bassin de surface S donnée, le coût d'investissement est fonction de la longueur, L , des digues de fermeture à construire. Les sites les plus favorables se situent dans des zones à marée de forte amplitude et correspondent aux faibles valeurs des rapports L/S et L/E .

Le remplissage du bassin peut être réalisé par passage de l'eau à travers les turbines ou à travers les ouvertures ménagées dans le barrage. Le passage à travers les turbines peut avoir lieu, soit dans un seul sens : cycle à simple effet, soit dans les deux sens : cycle à double effet. Pratiquement, les perfectionnements apportés aux caractéristiques des turbines (groupes "bulbe", voir plus loin) ont rendu possible la réalisation de cycles à double effet dans des conditions satisfaisantes.

[... Menu ...](#)

- [Turbines et roues à aubes](#)

extrait du "[Guide des Energies Renouvelables](#)" (MRW)

Les turbines

- Eléments constitutifs d'une turbine hydraulique

La turbine est à réaction lorsque la pression à l'entrée de la roue est plus grande que la pression à la sortie de la roue. Elle se compose des éléments suivants:

- Un distributeur fixe qui donne à l'eau une vitesse suffisante et une orientation qui permette d'aborder la roue sous l'angle adéquat car de faibles écarts de cet angle peuvent entraîner des pertes importantes de rendement
- Une roue mobile munie d'ailettes ou d'augets (forme de cuillère) qui a pour rôle de transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique.
- Un aspirateur-diffuseur qui récupère l'énergie cinétique de l'eau à la sortie de la roue en évacuant cette eau dans le bief aval. Ce dispositif crée une dépression à la sortie de la

roue de sorte que l'on profite non seulement de la plus grande partie de l'énergie cinétique mais encore de la hauteur géométrique entre la roue et le niveau aval.

Une turbine est à action lorsque les pressions à l'entrée et à la sortie de la roue sont égales. Elle se compose uniquement d'un distributeur et d'une roue mobile.

○ **Les turbines Pelton**

Utilisées pour les hautes chutes et faibles débits, elles sont réalisées avec axe horizontal ou, de plus en plus fréquemment, vertical.

La roue mobile comporte un certain nombre d'augets, en forme de double cuillère avec échancrure médiane. Leur nombre varie avec la hauteur de chute et la vitesse spécifique de rotation.

Le système de distribution est constitué par un injecteur comprenant une buse, une aiguille d'injection et un déflecteur. Ce dernier a pour objet de dévier brusquement le jet de la roue lorsque celle-ci tend à s'emballer, tandis que l'aiguille peut fermer ensuite l'injecteur aussi lentement qu'il est nécessaire. Une fermeture trop rapide peut en effet provoquer des coups de bélier dans la conduite d'alimentation. Aiguille et déflecteur sont actionnés par des servomoteurs à huile séparés, placés sous la dépendance d'un régulateur automatique. Un déviateur, appelé contre-jet, permet d'arrêter rapidement la roue lorsque l'admission d'eau est coupée (pour éviter que des vibrations n'abîment la fixation des axes de la turbine).

La constitution des bâtis varie suivant la disposition des machines, axe vertical ou horizontal, une ou deux roues, un ou plusieurs injecteurs.

○ **La turbine Francis**

La turbine Francis est composée de 8 à 15 aubes, de surface gauche et de profil type "aile d'avion". La roue a donc l'aspect d'un cylindre évidé en son centre d'un espace conique. L'eau pénètre les côtés du cylindre par l'intermédiaire d'un distributeur. Celui-ci est constitué d'un ensemble de directrices mobiles parallèles à l'axe de rotation de la roue; elles sont fixées à un disque fixe d'une part, et à un dispositif mobile de commande, appelé "cercle de vannage", d'autre part. Le rôle du distributeur est double: il sert avant tout à donner aux filets d'eau une direction

convenable à l'entrée de la roue, afin d'éviter les chocs, mais également à régler le débit.

Ce type de turbine est principalement utilisé pour les basses et moyennes chutes (de 5 à 100 m), les débits pouvant atteindre 30 m³/s. Pour les chutes supérieures à 6 m une bêche spirale amène graduellement l'eau au distributeur. On rencontre aussi bien la disposition avec arbre horizontal qu'avec arbre vertical.

- La turbine Banki

La turbine Banki est également appelée "Cross-flow turbine" ou turbine Mitchell.

Le nom "Cross-flow" (débit traversant en anglais) vient du fait que l'eau traverse la roue. L'eau actionne les ailettes à la fois à l'entrée et à la sortie de la roue.

Cette turbine peut fonctionner sous une large gamme de débits et de hauteurs.

- **Les turbines hélices et Kaplan**

La turbine hélice est constituée d'une hélice à pales fixes dont l'axe est parallèle au flux. La turbine hélice est bien adaptée aux basses chutes. Elle ne dispose pas de distributeurs pour les petites puissances.

La turbine Kaplan est une turbine hélice à pales mobiles. Cela permet un meilleur fonctionnement de la turbine sur une plus grande gamme de débits.

- Les groupes bulbes

Le groupe bulbe est constitué d'une turbine Kaplan et d'un alternateur constituant un ensemble complètement entouré par le courant d'eau: l'alternateur est contenu dans un bulbe métallique fermé. Cet ensemble tourne autour d'un axe horizontal, dans une conduite de diamètre légèrement supérieur à celui du cercle balayé par la roue.

Ce groupe permet de faire des économies importantes en génie civil.

Les roues à aubes ou roues hydrauliques

L'idée de transformer en énergie mécanique utilisable l'énergie contenue dans l'eau des rivières sous forme cinétique et sous forme potentielle est très ancienne.

Les premières machines transformatrices d'énergie furent des roues hydrauliques utilisables seulement pour les basses chutes.

Les roues hydrauliques à axe horizontal sont classées en trois types:

- o la roue "en dessus" ou à augets qui reçoit l'eau à sa partie supérieure;
- o la roue "de poitrine" ou de côté de type intermédiaire;
- o la roue "en dessous" ou roue à aubes.

La machine hydraulique idéale doit satisfaire à deux principes:

- o l'eau doit toujours pénétrer dans la machine sans produire de choc;
- o l'eau doit avoir perdu, au cours de sa traversée de la machine, la vitesse initiale qu'elle possédait à l'entrée.

Ces deux conditions doivent être satisfaites pour qu'il n'y ait pas de perte d'énergie sous forme de turbulence, ou sous forme d'énergie cinétique résiduelle.

Malheureusement, une bonne partie de l'énergie de la chute est perdue en raison de l'alimentation de la roue par un conduit ouvert.

Le rendement global d'une roue hydraulique est de l'ordre de 20%.

L'expérience montre, pour la roue de dessus, que les augets ne peuvent être remplis qu'aux deux tiers maximum et que la partie inférieure de la roue doit rester hors de l'eau.

[... Menu ...](#)

- **Situation contemporaine**

En Wallonie, une vingtaine de centrales hydro-électriques indépendantes produisent environ 6 050 000 kWh/an soit l'énergie électrique nécessaire à 1 730 ménages (2 000 tonnes de CO₂ en moins). Elles sont réparties sur l'Amblève, la Vesdre, la Lomme et la Lesse. La Lomme, une des rivières les plus

pentues de Belgique, rassemble une dizaine de sites de Saint-Hubert à Libin.

- **Moulins**

Témoins historiques

Belgique

Abbaye de Val-Dieu (Herve): ce moulin à grain a été reconverti en bar-restaurant, mais l'intégralité du mécanisme et des meules ont été conservés sur le site.

Moulin de Donstienne: ce moulin à grain a entièrement restauré pour la meunerie à l'ancienne.

France

Ambert (Puy-de-Dôme): moulin Richard-de-Bas, le plus vieux moulin à papier de France (1326).

Barbegal à Fontvieille (à quelques kms au Nord-Est de Nîmes). Ruines d'un grand complexe antique de 16 moulins à roue verticale. Voir l'[historique](#)

Moulin de Bassilour

Moulin à farine et boulangerie (fermée le mardi)
Quartier Bassilour
F-64210 Bidart (Pays basque)
Tél.: 59 41 94 49

Barrage du Bazacle (Toulouse): ce barrage du 12^e siècle sur la Garonne entraînait 12 moulins horizontaux.

Nederland

Réseau des moulins de Kinderdijk-Elshout (inscrit comme bien culturel du Patrimoine mondial). Ces moulins ont servi à l'assèchement des polders pour favoriser la colonisation agricole et humaine.

Portugal

25 000 moulins à roue horizontale y ont été recensés.

Suisse

Moulins souterrains du Col-des-Roches: dès 1549, un moulin à farine fut construit sur le parcours d'une rivière souterraine de 2 500 m. A l'apogée de l'exploitation, il y avait sous la montagne une huilerie, deux moulins à farine, un battoir et une scierie. Abandonnés en 1890, les moulins sont dégagés et restaurés depuis 1973.

Visites de mai à octobre:
Fondation des moulins souterrains du Col-des-Roches
CH-2412 Col-des-Roches
Tél.: 41/39 31 89 89

Microcentrales contemporaines

En Wallonie:

- **Amblève**: Maraite et Piront à Ligneuville
- **Bocq** : HME-Muyle à Dinant
- **Eau d'heure**: Goegnies à Philippeville
- **Lesse**: Denis II à Anseremme
- **Lomme**: Baudewyns I et II et Dony I et II à Poix-Saint-Hubert

- Dony I: (d'après "Les compagnons d'Eole", septembre 1997, p.9).

Cette installation comprend un barrage poids et un étang de retenue de 5 ha/100 000 m³ d'eau (creusé en 1880). Un canal de dérivation avec régulation du débit d'eau assure l'alimentation de la centrale par un dégrilleur et une conduite forcée. Une chute d'eau de 13,2 m fait tourner une turbine Banki de 45 KW et une turbine Francis de 33 KW (rendement supérieur à 90 %), installées en 1982. Chaque turbine entraîne, par l'intermédiaire d'une courroie plate, un générateur asynchrone couplé au réseau. La production annuelle d'environ 450 000 kWh, dont 75 000 pour la consommation propre, approvisionne tout le village également. Cette micro-centrale, située à 200 m de la gare SCNCB de Poix-Saint-Hubert, est accessible tous les jours de vacances scolaires de 10 à 18 h.

<http://www.poix-saint-hubert.com/>

- **Our**: Zeyen
- **Ourthe**: Evrard et Méry à Aywaille
- **Vesdre**: Denis I et Gamby I et II à Dolhain, Hardt à Chaudfontaine
- **Warche**: Mayerez à Ligneuville

[... Menu ...](#)

Pour en savoir plus:

- [Personnes-ressource et associations](#)

Belgique

Abelpha

Association belge des producteurs autonomes
Marc Baudewins
39, Grand'rue
B-4960 Ligneuville
Fax: +32 (0)61/ 61 24 00

Amis des moulins asbl

Rue des Bollandistes, 45
B-1040 Bruxelles
tél. : +32 2 732 80 08 & fax : +32 2 735 96 40
amis.moulins.wal.bx@chello.be
<http://users.skynet.be/moulins/>

t'Serstevens Jean-Jacques

(inventaire des moulins en Belgique francophone)
Tel : +32 2 732 13 89
jjtec@chello.be

France

La Fédération Française des Amis des Moulins

recense les moulins en France
5, rue Villiot
F - 75012 Paris
Tél : +33 1 43 47 43 47

Usine marée motrice de la Rance

F-35780 La Richardais
Tél.: +33 (0)2 99 16 37 14

- [Liens sur la "toile"](#)

[case studies](#) - [Roues hydrauliques des forges en Savoie](#)

- [Liens dans Ecotopie](#)

[énergies renouvelables](#)

[Bibliographie](#)

Anonyme.

Micro-hydro design manual. A guide to small-scale water power schemes.
Adam Harvey.

Anonyme.

Les petits aménagements hydroélectriques. Guide pour la conception, la réalisation, la mise en service et l'exploitation.
Société hydrotechnique de France. 199, rue de Grenelle, 75007 Paris, France.

Anonyme.

Adaptation du comportement dynamique des régleurs de turbines hydrauliques pour le réglage de réseaux.
Rev. Brown Boveri, Tome 47, N 10/11.

André, H., Audinet, M., Mazeran, G. et Richer, C.
Hydrométrie pratique des cours d'eau.
Eyrolles Editeurs. Paris, France.

Association européenne de la petite hydraulique.
Esha Info.
Revue disponible au 50, rue du Taciturne, 1040 Bruxelles, Belgique.

Berthold, R. et Narayan, V. (1981).
Délestage et découplage de réseau.
Rev. Brown Boveri 6/7.

Chapron, M. (1979).
L'Industrie française des microcentrales hydroélectriques.
Annales des Mines, avril.

Electricité de France.
Les microcentrales hydroélectriques. Principe et pratique.
EDF. Information et communication. Paris, France.

Etienne, J. et Chadenson, P. (1981).
Les minigroupe hydroélectriques (100 à 1.000 kW).
La Houille Blanche N 4/5.

Fraenkel, P. et Peter B.J.
The Power Guide.
An intermediate technology publication. Myson House. Railway Terrace. Rugby
CU 21 3HT, UK.

Ginocchio, R.
L'Energie hydraulique.
Eyrolles, France.

GRET (1979).
Les microcentrales hydrauliques.
Dossier technologique et développement.

Hothersall, R.J. (1984).
Micro-hydro: turbine selection criteria.
Water Power & Dam Construction, Feb.

Lefort, P. (1989).
Les Turbomachines.
PUF N 1.365.

Lencastre, A.
Manuel d'hydraulique générale.
Eyrolles, Paris, France.

Monition, L., Le Nir, M. et Roux, J.
Les Microcentrales Hydroélectriques.
Ed. Masson. Paris, France.

Moulin, C., Wegner, M., Eremeef, R. et Vinh-Phong (1977).
Méthodes de tracé des turbomachines hydrauliques.
La Houille Blanche N 7/8.

Les moulins-bateaux

Alain Peyronnel, "Les Moulins de France" numéro 7 et 8, octobre 1979.

Les moulins à vent et à eau

Jean Orsatelli, éditions Jeanne Laffitte 1979.

Les ouvrages hydrauliques en Wallonie

Ministère de la Région wallonne, DGATLP 1997.

Pani, B.S. and Dah, R.N. (1983).
Reattached flow from rectangular outlets arranged in a line.
Water Power & Dam Construction, mai.

Petit, Ch. (1981).
Microcentrales hydroélectriques d'une puissance inférieure à 100 kW.
La Houille Blanche N 4/5.

Picollier, G. (1977).
Turbomachines hydrauliques. Essais industriels et méthodes de calcul.
La Houille Blanche N 7/8.

Rabaud, J. et Picollier, G. (1981).
Les groupes pour petites centrales de production (1.000 à 8.000 kW).
La Houille Blanche N 4/5.

Remineras.
L'Hydrologie de l'ingénieur.
Collection Eyrolles. Paris, France.

Reynolds, R.M. and Lowell, Jr F.C. (1983).
Turbine efficiency monitoring system.
Water Power & Dam Construction, mai.

Teichman, H.T. (1983).
International standardization of small hydro schemes.
Water Power & Dam Construction, mai.

Tenot.
Turbines hydrauliques et régulateurs automatiques de vitesse.
Eyrolles, Tome I à IV, 1930 - 1935 - Paris, France.

Thiery, D.
Détermination du débit d'équipement d'une microcentrale hydroélectrique.
BRGM.

Thiery, D.
Analyse de la rentabilité d'une microcentrale hydroélectrique.
BRGM.

Vivier, L.
Les turbines hydrauliques et leur régulation.
Editions Albin Michel.

Warnick, C.C. (1984).
Hydropower engineering.
Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, NJ 07632.

[... Menu ...](#)

- [Périodiques](#)

L'eau au moulin

Trimestriel de liaison pour les petites centrales hydroélectriques et les technologies durables. Rédacteur: Jean-Jacques t'Serstevens (APERe)
Edité par l'[APERe asbl](#)

- [Visites et rencontres](#)

Journée des moulins en France

chaque 3e dimanche de juin


Organisé par la Fédération française des Amis des Moulins

[... Menu ...](#)

Paul De Neyer, mars 2005

Le logogramme hydraulique et le fond de page ont été adaptés pour le Web par [Marilyn Walravens](#)

Ecotopie [Accueil](#)

 [Envoi à Ecotopie](#)
