



Quelles stratégies industrielles pour la filière H₂ ?

De façon plus ou moins structurée et volontariste, des stratégies de mise en place d'une filière hydrogène se dessinent dans les pays industrialisés les plus impliqués, d'abord en Amérique du Nord et au Japon. En Europe, les initiatives pour une approche mieux coordonnée accompagnent d'importants efforts nationaux et régionaux, en particulier en France.

Un véhicule Opel (groupe General Motors) équipé d'une pile à combustible a récemment traversé l'Europe entre Hammerfest, au nord de la Norvège, et Cabo da Roca, au Portugal, point le plus occidental du continent européen.



Les stratégies de R&D et de mise en œuvre en Amérique du Nord, au Japon et en Europe

Chacun avec ses spécificités, les pays développés jettent les bases du tissu industriel qui devra transformer en réalités concrètes les fruits de la R&D dans la filière hydrogène.

L'hydrogène apparaît comme une solution très attractive à une série de problèmes critiques comme le changement climatique global et la sécurité d'approvisionnement en combustibles. Le champ des acteurs étant très morcelé (constructeurs automobiles, opérateurs énergétiques, entreprises liées aux infrastructures, gestionnaires de flottes de véhicules, gouvernements, etc.), une coordination des différents intervenants est un prérequis à la mise en œuvre de l'hydrogène comme nouveau combustible pour véhicules.

Les gouvernements doivent prendre l'initiative pour délimiter les frontières et créer des conditions susceptibles de garantir une sécurité aux investisseurs. La formulation d'une stratégie doit, en conséquence, considérer les constantes de temps sous-jacentes à une transition vers des combustibles et des systèmes de propulsion plus propres. Il s'agit, d'une part, d'évaluer la durée minimale de cette transition et, d'autre part, d'estimer le temps qu'il faudra pour éviter de sérieux problèmes.

Les champs d'action sont nombreux. Pour n'en citer que quelques-uns : les politiques de réduction des gaz à effet de serre (GES), la taxation des carburants, les normes de consommation des véhicules, les incitations au développement de capacités de génération d'énergies renouvelables et de composants pour les infrastructures de distribution de l'hydrogène, etc.

États-Unis : des initiatives décisives

Les États-Unis, particulièrement depuis les attentats du 11 septembre 2001, voient dans la sécurité d'approvisionnement en combustibles un problème majeur, ce qui a donné une impulsion significative à l'hydrogène. Des activités déjà existantes dans le domaine de la propulsion alimentée par des piles à combustible (PAC) se sont ainsi trouvées directement liées à l'hydrogène comme combustible de choix. La décision de General Motors (GM) de choisir l'hydrogène comme le

combustible propre des véhicules équipés de piles à combustible (FCV) est de toute première importance. La "feuille de route" établie par le gouvernement américain prend ces besoins et ces décisions stratégiques en compte quand il essaie de résoudre les questions critiques en suspens (par exemple, la production et le stockage de l'hydrogène, la réduction du coût des piles, l'infrastructure de distribution, etc.) d'ici 2015 afin d'encourager un vaste déploiement de FCV produits en grande série vers 2020 au plus tard.

C'est dans ce cadre qu'est envisagée la création d'un "couloir de l'hydrogène" de la Californie au Colorado, avec des stations-service tous les 160 km environ. Le gouverneur de la première a déjà signé un ordre exécutif obligeant le gouvernement à installer 200 stations d'ici 2010. Plusieurs États américains (en particulier la Floride, le Michigan et l'Illinois) développent des projets de démonstration de flottes de véhicules à hydrogène.

Canada : investissements dans l'infrastructure

Au Canada, dans le cadre des financements destinés à assurer le respect par Ottawa de ses obligations de réduction des émissions de GES en application du **protocole de Kyoto**, quelque 130 millions de dollars canadiens sont dédiés à des projets de développement et de démonstration dans le secteur des piles à combustible, une part significative de cette somme allant aux investissements dans l'infrastructure hydrogène. Un projet prévoit de relier la frontière avec les États-Unis au domaine skiable de Whistler (Colombie britannique) pour les Jeux olympiques d'hiver 2010, un autre de relier Windsor (Ontario) et Montréal (Québec) par un corridor "hydrogène" de plus de 900 km. Idéalement, ces corridors permettraient de tester localement des véhicules et l'infrastructure hydrogène dans les zones stratégiques de l'Ontario bordant le Michigan (par exemple, Stuart Energy, Hydrogenics et GM) et de la Colombie britannique (comme Ballard et Methanex).

Japon : une politique bien structurée

En tant que deuxième marché automobile mondial, le Japon a une approche bien structurée et coordonnée dans les domaines de l'hydrogène et des PAC. Celle-ci fait l'objet d'un accord entre l'industrie, le gouvernement et la société civile. Le développement de la technologie pour les véhicules à pile à combustible est considéré comme étant principalement du ressort de l'industrie tandis que la mise en place initiale de l'infrastructure de distribution relèverait d'initiatives soutenues par le gouvernement. Plusieurs conditions sont structurellement très favorables à l'introduction de véhicules équipés de PAC à l'hydrogène : le Japon est un archipel, les distances routières moyennes y sont plus courtes et les vitesses maximales moins élevées qu'en Europe ou aux États-Unis. C'est pourquoi les technologies déjà existantes de stockage de l'hydrogène permettent des autonomies suffisantes. Des systèmes électriques et les infrastructures d'entretien connexes sont mis sur le marché par le biais de **véhicules hybrides** électricité/essence. Une approche coordonnée existe entre l'industrie et le gouvernement, alors que le pays importe toute



Station hydrogène de Yokohama-Daikoku (alimentée par une unité de reformage à la vapeur) mise en service dans le cadre du projet japonais JHFC (Japan Hydrogen and Fuel Cell demonstration project).

l'énergie pour la production du combustible de ses véhicules.

Ce sont là les ingrédients d'une commercialisation réussie de véhicules équipés de piles à combustible et qui ne dépendrait même pas de marchés à l'exportation.

Europe : une approche plus coordonnée

L'Europe, en manque de stratégie cohérente sur l'hydrogène et les piles à combustible, n'a que récemment engagé une approche plus coordonnée à travers la plate-forme européenne pour les technologies de l'hydrogène et des PAC de la **Commission européenne** (*European hydrogen and fuel cell technology platform*).

D'autre part, l'Union européenne s'est donné l'obligation de produire 12 % de la totalité de ses besoins énergétiques à partir de sources renouvelables d'ici 2010. Elle s'est en outre fixé pour objectif de couvrir d'ici 2020 au moins 20 % de tous les besoins en combustibles du secteur des transports à partir de sources non pétrolières, dont 5 % avec l'hydrogène. Les premières stations-service distribuant de l'hydrogène dans l'Union sont mises en place à travers les programmes européens Cute et Ectos. D'autres sont en construction à Berlin, Munich, Malmö et Milan. Elles devraient fournir une occasion idéale de constituer des groupes locaux de fourniture d'hydrogène.

➤ **Reinhold Wurster**
L-B-Systemtechnik
Otto-brunn (Allemagne)



Une dizaine de villes européennes, dont ici Amsterdam, ont commencé à tester des bus électriques Citaro équipés de piles à combustible alimentées en hydrogène.

A L'énergie dans tous ses états

« Rien ne se perd, rien ne se crée », écrivait en son temps Lavoisier, père de la chimie moderne. Cet adage vrai pour les espèces chimiques l'est tout aussi pour l'énergie. En effet, l'énergie est une entité multiforme qui peut se transformer sous de très divers aspects. Toutefois, les **énergies primaires** directement accessibles dans la nature sont en nombre limité : ce sont les **énergies fossiles** (charbon, pétrole, gaz), l'**énergie nucléaire** et les **énergies renouvelables** (hydraulique, **biomasse**, solaire, éolien, géothermie, énergie des marées). Ces énergies primaires constituent ce que l'on appelle le **mix** ou le **bouquet énergétique** (figure 1).

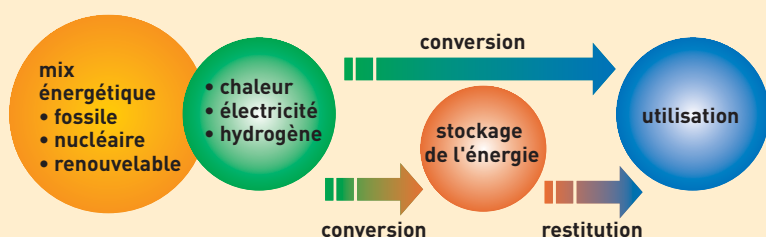


Figure 1.
Le schéma énergétique.

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de **convertir** l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers **convertisseurs énergétiques** que sont les êtres vivants. Les plantes, par la **photosynthèse**, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique. Le corps humain lui-même permet, en particulier, de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique *via* le système musculaire. Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs (figure 2). Le premier en date est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Plus récemment un poste de télévision assure la conversion de l'électricité en énergies lumineuse (images) et mécanique (sons). En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, comme par exemple une centrale nucléaire qui réalise la conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique (réacteur) puis en énergie mécanique (turbine) et enfin en énergie électrique (alternateur). Malheureusement, le **second principe de la thermodynamique** nous enseigne que toute transformation de l'énergie a

un coût : une partie plus ou moins importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur inutilisable (le frottement dans un système mécanique par exemple). Dans le cas d'une centrale nucléaire de la génération actuelle, l'énergie électrique produite ne représente qu'environ un tiers de l'énergie nucléaire initiale contenue au sein du combustible. Mais il serait bien évidemment trop simple que l'énergie puisse être consommée au fur et à mesure sur le lieu même de sa production. Dans de très nombreux cas, les sites de consommation de l'énergie peuvent être très éloignés du site de production, cette dernière et la demande correspondante n'étant

pas de plus toujours concomitantes (électricité photovoltaïque la nuit, par exemple). Une bonne gestion de l'énergie demande donc la mise en place à la fois d'un **réseau de distribution** et de capacités de **stockage de l'énergie**. Le **transport de l'énergie** est assuré par l'intermédiaire d'un **vecteur éner-**

gétique. À l'heure actuelle, les deux principaux vecteurs sont l'**électricité** et la **chaleur**. Mais demain un nouveau vecteur pourrait devenir prépondérant : l'**hydrogène** qui serait converti en électricité et chaleur grâce aux **piles à combustible**.

Enfin, pour que l'énergie puisse être disponible à tout moment il est indispensable de pouvoir la stocker : la "mettre en conserve" pourrait-on dire. Ce **stockage** peut se décliner sous diverses formes. L'énergie peut être stockée sous forme **mécanique** (*énergie potentielle* dans le cas d'une retenue d'eau d'un barrage hydroélectrique ou *énergie cinétique* dans un volant d'inertie), **thermique** (ballon d'eau chaude), **chimique** (réservoir d'essence, piles et **accumulateurs**), voire **magnétique** (bobine **supraconductrice**).

La gestion de l'énergie est donc un art subtil qui associe production, transformation, transport et stockage. Dans le contexte actuel du débat énergétique, il apparaît de plus en plus évident que demain les réseaux énergétiques vont se développer et se multiplier selon une approche multimodale (gestion simultanée de plusieurs réseaux associant des sources d'énergies diversifiées). Les **nouvelles technologies de l'énergie** sont donc appelées à y jouer un rôle essentiel.

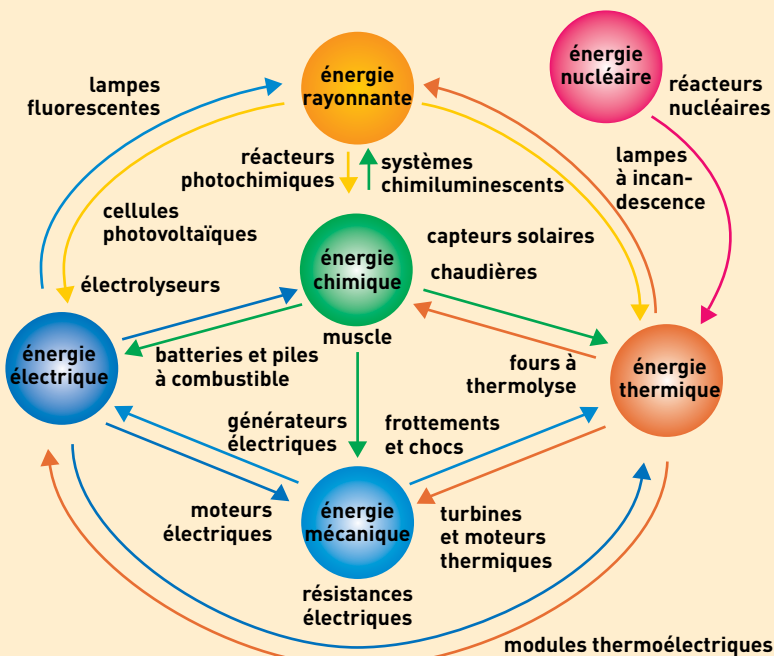
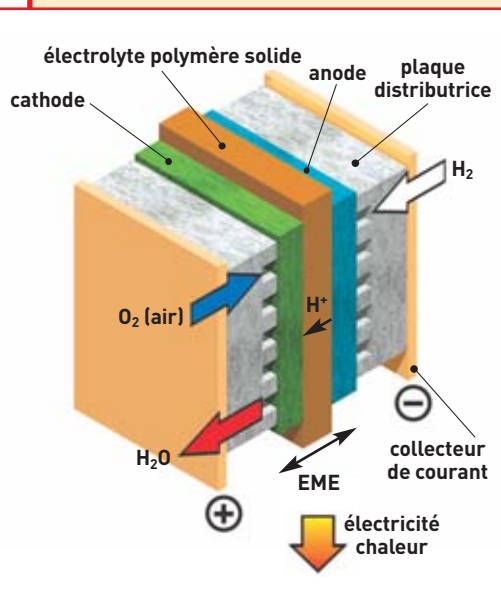


Figure 2.
Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H^+) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau : $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$. Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50 %, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.

E Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration

Les **accumulateurs** et les **piles** sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en wattheure (Wh), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux **électrodes** baignant dans un **électrolyte** lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme **batterie** est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa **densité de puissance massique**, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Sa **cyclabilité**, exprimée en nombre de cycles⁽¹⁾, caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale, cette valeur étant la valeur la plus souvent demandée pour les applications portables.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au **plomb** (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques...) et les accumulateurs **nickel-cadmium** (outillage portable, jouets, éclairage de secours...). La technologie au plomb, connue plus communément sous

le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), soit à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent). Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium).

Au début des années quatre-vingt-dix, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs **nickel-métal hydrure** et les accumulateurs au **lithium** (voir l'encadré *Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium*, p. 131). La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une électrode négative – constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène – plongeant dans une

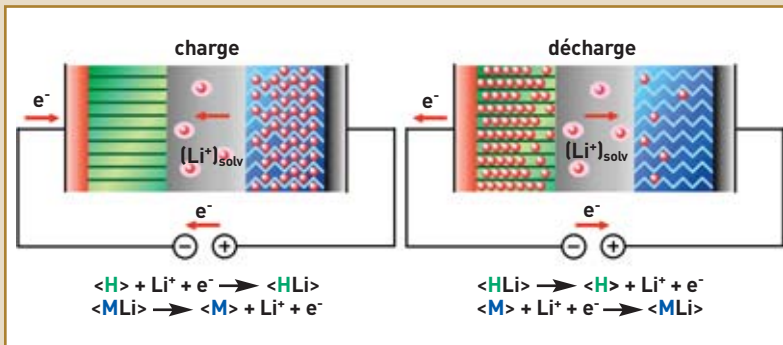
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium métallique (filiale **lithium-métal**). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années quatre-vingt, des recherches ont été entreprises sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone, utilisé comme composé d'insertion du lithium. La filière **lithium-ion** était née. Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que *leaders* dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils ont considéré la source d'énergie comme faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, a décidé de mobiliser au cours des années quatre-vingt des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable. En février 1992, Sony annonçait à la surprise générale le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/kg en 2004), grâce d'une part aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et d'autre part à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 200 Wh/kg sont escomptées vers 2005.

(1) Un cycle correspond à une charge et une décharge.

Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium

1

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'**accumulateur**, le lithium relâché par l'**électrode négative** (matériau d'intercalation hôte <H>) sous forme **ionique** Li^+ migre à travers l'**électrolyte** conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'**électrode positive** (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique <Mli>). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un **électron** dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La **densité d'énergie massique** libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,94 g) et le plus **réducteur** des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4 V, contre 1,5 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de



160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone. Dans ce deuxième cas, la filière technologique est appelée *lithium-ion*, car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, et fait "yo-yo" entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur.

B Effet de serre et CO₂

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en **rayons infrarouges**. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 **watts/m²**. Sans **effet de serre**, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (**gaz carbonique**, **méthane**, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m². Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m², le **gaz carbonique** (CO₂) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m²), les **halocarbures** (chlorofluorocarbures **CFC**, hydrochlorofluorocarbures **HCFC** et hydrofluorocarbures **HFC**) avec 0,34 W/m² et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m². En outre, l'**ozone** troposphérique présente un forçage radiatif positif de 0,35 W/m² (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif négatif de 0,15 W/m²).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m²) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1%. Néanmoins, il est presque certain qu'il

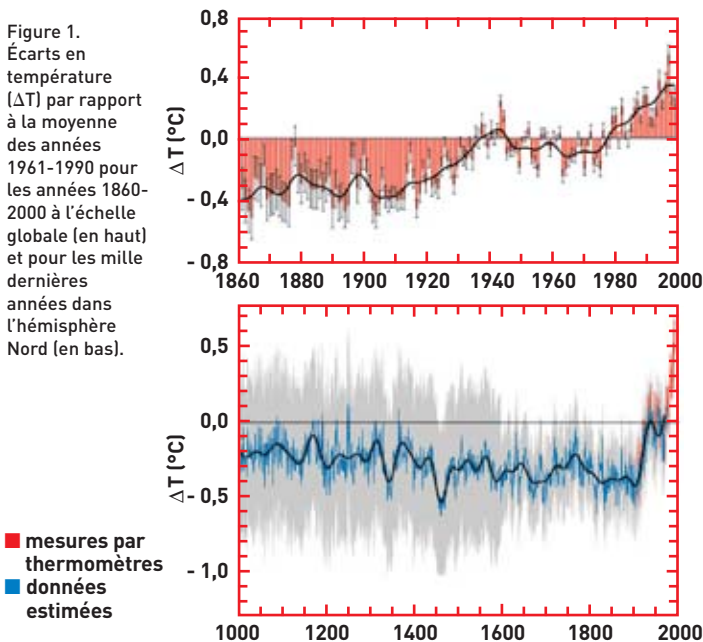
a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (**figure 1**). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (**figure 2**) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle⁽¹⁾ de combustibles **fossiles** (7 700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO₂ actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6 000 à 8 000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

Figure 1.
Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).



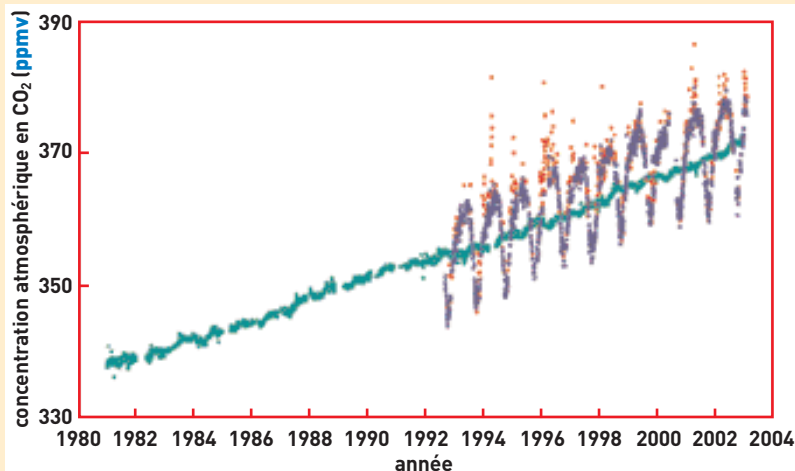


Figure 2.

Évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.

Les mesures à l'île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO_2 (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO_2 se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO_2 en hiver et absorbeur en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de **gaz à effet de serre** (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction

globale des émissions de ces gaz, de 5,2% en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8% et 0%. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du **protocole de Kyoto**, maintenant prévue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie. Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (**PNUE**), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures



La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1^{er} janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).