

L'hydrogène vert

DU MÊME AUTEUR

L'atome écologique, EDP Sciences, 1998

L'énergie en 2050, nouveaux défis et faux espoirs, EDP Sciences, 2006

Les déchets nucléaires : état des lieux et perspectives, EDP Sciences, 2011

Promesses et réalités des énergies renouvelables, EDP Sciences, 2013

Une introduction à la neutronique, Presses des Mines, collection
« Les cours », 2^e édition, 2022

L'hydrogène vert

*Le défi de demain, pour une énergie
inépuisable et décarbonée*

BERNARD WIESENFELD



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Composition et mise en pages : Flexedo
Couverture : Conception graphique de B. Defretin, Lisieux
Illustration de couverture : peb & fox

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-2919-4
ISBN (ebook) : 978-2-7598-2920-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2023

SOMMAIRE

<i>Introduction</i>	7
1. Qu'est-ce que l'hydrogène	11
Historique de l'hydrogène, du siècle des lumières à nos jours.....	11
Propriétés énergétiques de l'hydrogène	15
L'hydrogène : une matière première pour l'industrie et un vecteur énergétique pour les mobilités.....	16
Sécurité liée à l'utilisation de l'hydrogène	17
2. Les « gisements d'hydrogène » n'existent pas	27
Généralités sur la production de l'hydrogène.....	28
Procédés de production de l'hydrogène utilisant l'énergie fossile	41
Procédés de production de l'hydrogène utilisant les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire	47
3. Comment stocker, transporter et distribuer l'hydrogène	53
Le stockage : une gamme large de solutions.....	53
Transport et distribution	58
4. Les piles à combustibles ou piles « inusables »	63
La pile alcaline (AFC)	69
La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	70
La pile à acide phosphorique (PAFC).....	72
La pile au carbonate fondu (MCFC)	73
La pile à oxyde solide (SOFC).....	74
La pile au méthanol (DMFC).....	76
5. L'hydrogène : une matière première à notre disposition	79
Dans la chimie et la pétrochimie.....	81
Dans le réseau de transport de l'électricité	85
6. L'hydrogène, un vecteur énergétique pour les transports terrestres et aériens	91
L'hydrogène pour décarboner les transports terrestres	91
L'hydrogène pour décarboner l'aviation commerciale	100
Le stockage de l'hydrogène liquide	112
L'hydrogène pour décarboner l'aviation légère.....	113
7. L'hydrogène, un carburant pour les mobilités spatiales	115
Quelques rappels historiques.....	115
La radioactivité à la conquête de l'espace	118
La propulsion d'une fusée	120
La propulsion nucléaire et la problématique d'un voyage vers la planète Mars	125

Notion de doses radioactives	130
Les rayonnements cosmiques	132
Quelques notions préliminaires sur la physique des réacteurs nucléaires	135
Avantages de la propulsion nucléaire dans un vol vers Mars et au-delà	139
L'hydrogène et la propulsion nucléaire thermique	141
<i>Conclusion</i>	
<i>De l'hydrogène chimique à l'hydrogène énergétique</i>	<i>151</i>

Annexes

Définitions.....	160
Sigles et acronymes	164
Bibliographie	167

INTRODUCTION

L'Homme a longtemps cru que la Terre était infinie et ses ressources illimitées.

Il découvre aujourd'hui qu'il vit dans un espace restreint et que la pénurie menace son existence.

Il sait depuis longtemps que le climat peut perturber ses activités.

Il apprend maintenant que ses activités peuvent provoquer un désastre climatique.

Face à ces contraintes de plus en plus oppressantes, auxquelles s'ajoute l'instabilité géopolitique planétaire grandissante, nous devons nous adapter à un monde qui change et trouver des pistes pour construire un avenir meilleur.

Une de ces pistes consiste à abandonner définitivement l'usage du charbon, du gaz et du pétrole parce qu'ils nous placent dans une position inconfortable de dépendance énergétique vis-à-vis des pays fournisseurs souvent politiquement instables et par ailleurs, parce qu'en brûlant, ces énergies fossiles dégagent dans l'atmosphère des produits toxiques pour l'Homme (monoxyde de carbone, dioxyde de soufre ou d'azote...), ou susceptibles de perturber le climat (dioxyde de carbone).

Ainsi, il faut que les énergies de remplacement soient abondantes et disponibles sur le territoire national, qu'elles soient « propres » et bien sûr il faut vérifier leur faisabilité technique et économique.

L'objectif de cet ouvrage est de démontrer que, sous certaines réserves, l'hydrogène peut être l'une de ces énergies de remplacement.

En effet, il sera montré aux chapitres 1 et 2 que l'hydrogène est un élément abondant dans la nature et qu'il peut être produit de façon « propre ».

Nous montrerons ensuite au chapitre 3 que des solutions techniques et économiques acceptables existent pour assurer la logistique (stockage, transport et distribution).

Toutes les possibilités d'utilisation de l'hydrogène seront déclinées dans les chapitres 5, 6 et 7, en considérant les deux fonctions principales qu'il peut assurer :

- une matière première pour l'industrie ;
- un vecteur énergétique pour les mobilités.

Aujourd'hui, l'usage principal de l'hydrogène réside dans la synthèse de l'ammoniac et la désulfuration des hydrocarbures, c'est-à-dire dans l'industrie chimique.

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique ne se rencontre que dans la propulsion des fusées. À l'évidence, la consommation de l'hydrogène dans cette activité spécifique est globalement très faible.

Cependant, nous verrons que l'utilisation de l'hydrogène, pour la propulsion des différentes mobilités, terrestres, aériennes et spatiales, est vouée à un développement important à court et moyen termes, d'autant qu'il existe une volonté politique avérée de soutenir différents projets en ce sens.

Les utilisations de l'hydrogène énergétiques qui sont plébiscitées par les industriels sont de deux types :

- soit l'hydrogène alimentera une pile à combustible associée à un moteur électrique, pour propulser un véhicule terrestre ou un avion léger de l'aviation générale ;

- soit l'hydrogène brûlera à la place du kérosène dans la chambre de combustion pour propulser un avion de ligne turbopropulseur ou turboréacteur.

Dans le premier cas, la pile à combustible peut être couplée à une batterie. On parlera d'une solution hybride. En ce qui concerne les véhicules terrestres, on aura donc à notre disposition plusieurs solutions de propulsions entièrement électriques qu'il sera utile d'évaluer et comparer, à savoir les propulsions par batterie, par pile à combustible et par hybridation batterie/pile à combustible.

Dans le deuxième cas, étant donné l'activité du trafic aérien, l'hydrogène seul ne pourra pas remplacer le kérosène pour des raisons de logistique et on cherchera d'autres carburants alternatifs.

Une autre utilisation qui va se développer dans les prochaines décennies est la propulsion spatiale. La propulsion des premières fusées avec l'hydrogène liquide remonte aux années soixante. Aujourd'hui, l'industrie des lanceurs spatiaux vers des orbites terrestres basses est le plus gros consommateur d'hydrogène liquide (Saturn, SLS, Ariane, Soyouz...).

Cependant, les meilleures propulsions pour des vols habités plus lointains font débat.

Nous expliquerons dans cet ouvrage pourquoi, selon nous, la meilleure solution pour la propulsion d'un vol habité vers la planète Mars passe par l'utilisation d'un réacteur nucléaire comme source de chaleur et de l'hydrogène comme gaz propulsif.

Ainsi, après avoir analysé les très riches potentialités de l'hydrogène, nous tenterons d'en déduire que le grand défi de demain résidera dans le passage de l'hydrogène chimique à l'hydrogène énergétique de propulsion.

1

Qu'est-ce que l'hydrogène

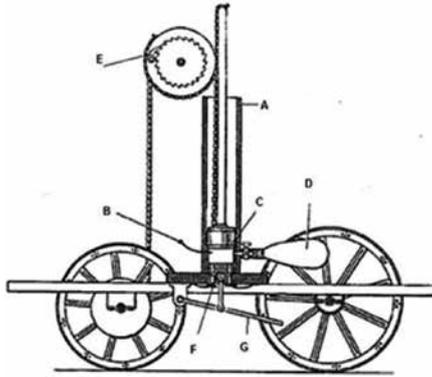
HISTORIQUE DE L'HYDROGÈNE, DU SIÈCLE DES LUMIÈRES À NOS JOURS

- 1782 : Lavoisier réalise la première synthèse de l'eau, à partir de l'hydrogène (étymologiquement « hydor » eau et « genno » engendrer) et l'oxygène.

- 1804 : Gay-Lussac démontre que l'eau est composée d'un volume d'oxygène et de deux volumes d'hydrogène.

- 1805 : Isaac de Rivaz construit la première voiture, la « charrette de Rivaz » (voir fig. 1.1) dont le moteur à explosion fonctionne à l'hydrogène et cela, plus d'un demi-siècle avant le premier moteur à essence de Beau de Rochas.

Cependant, son invention ne fut pas prise au sérieux par ses contemporains et l'Académie des sciences considéra que le moteur à combustion interne ne rivaliserait jamais avec la machine à vapeur !



Principe de la « charrette » de Rivaz (1802) : A = cylindre, B = allumage, C = piston, D = réservoir de gaz des marais, E = gâchette, F = piston avec soupapes pour l'admission et l'échappement, G = manette du piston

Figure 1.1 | La « charrette de Rivaz », 1^{re} voiture avec un moteur à explosion.

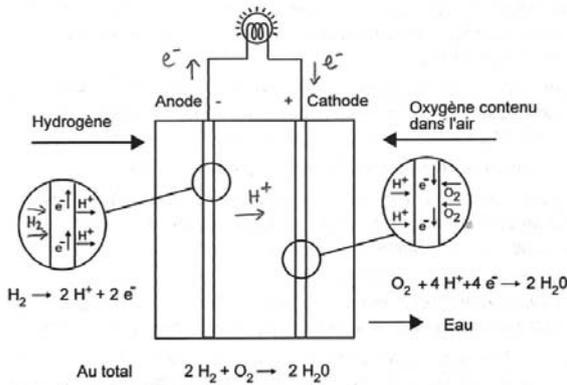
- 1839 : la première pile à combustible est mise au point par le physicien britannique William R. Grove, mais il faut attendre plus d'un siècle avant la réalisation du premier prototype (F.T. Bacon, 1953).

C'est le procédé inverse de l'électrolyseur, découvert par William Nicholson en 1800 (voir fig. 1.2).

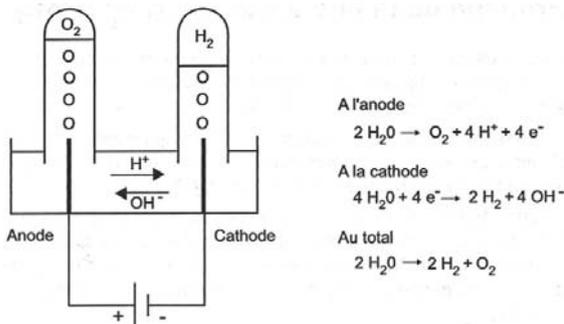
- 1871 : Mendeleïev établit la classification périodique des éléments et y place l'hydrogène dans la 1^{re} case. C'est l'élément le plus léger (voir tab. 1.1).

En fait, la première tentative de classification des éléments remonte à Lavoisier qui, un siècle plus tôt, en 1789, proposa un « tableau des substances simples » dans son *Traité élémentaire de chimie*. Il fut le premier à introduire le concept d'élément chimique en tant que substance simple ne pouvant pas être décomposée en d'autres substances.

- 1918 et 1931 : Haber et Bosch obtiennent le prix Nobel pour l'invention d'un procédé de synthèse chimique de l'ammoniac (voir fig. 5.3) qui sera perfectionné plus tard par Georges Claude, fondateur de la société Air Liquide.



a - Pile à combustible



b - Électrolyse de l'eau

Figure 1.2 | La pile à combustible (PAC) produit de l'électricité et de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène. L'électrolyseur, procédé inverse, produit de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau et de l'électricité.

- Au début du xx^e siècle, l'hydrogène, mélangé au monoxyde de carbone, est utilisé pour l'éclairage public.
- 1913 : le modèle physique de l'atome de Niels Bohr permet d'interpréter le spectre du rayonnement émis par l'hydrogène au travers d'un prisme et constitue l'une des premières expériences de physique quantique (voir fig. 1.3).
- Depuis les années 1960, les États-Unis emploient l'hydrogène pour propulser leurs fusées, d'abord Saturn, puis Falcon et enfin

SLS (*Space Launch System*) depuis 2022, à l’instar de la plupart des lanceurs de la planète : Ariane (voir fig. 1.5), Soyouz, Chang Zheng... et embarquent des piles à combustible à bord de leurs véhicules pour les alimenter en électricité (par exemple la capsule Apollo, voir fig. 1.4).

Tableau 1.1 | Le tableau de Mendeleïev

Tableau périodique des éléments

Numéro atomique → 26 30,8 ← Masse atomique molaire (ou nombre de masse de l'isotope de durée de vie la plus longue) Symbole de l'élément → Fe Nom de l'élément → Fer																						
1																	2					
1	H																	He				
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og				
57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Dy Ho Er Tm Yb Lu Lanthane Cérium Praseodyme Néodyme Prométhée Samarium Europium Gadolinium Terbium Dysprosium Holmium Érythre Thulium Ytterbium Lutécium 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr Actinide Thorium Protactinium Uranium Néptunium Plutonium Americium Curium Berkelium Californium Éinsteinium Fermium Mendelevium Nobelium Lawrencium																						

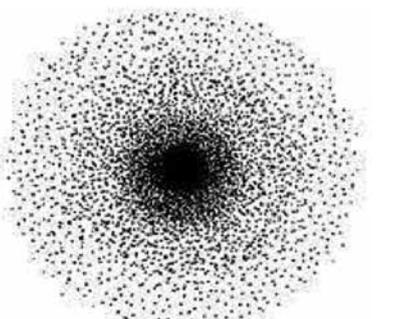


Figure 1.3 | L’atome de Bohr et son nuage électronique, représentant la probabilité de présence de l’électron autour du noyau, conformément au principe d’incertitude d’Heisenberg, principe fondateur de la mécanique quantique, qui stipule que l’on ne peut pas connaître avec précision, à la fois la vitesse et la position d’un électron qui gravite autour de son noyau.

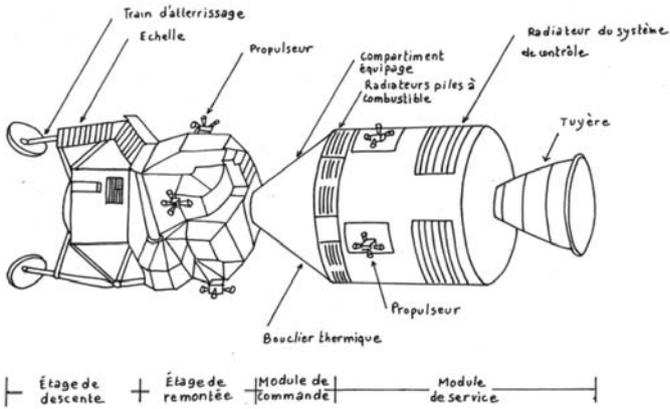


Figure 1.4 | La capsule Apollo.

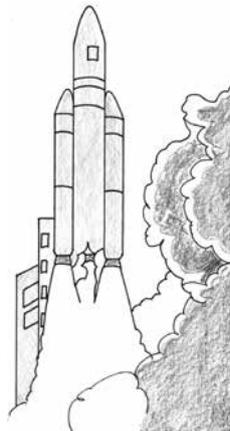


Figure 1.5 | La fusée Ariane V au décollage de Kourou, Guyane.

PROPRIÉTÉS ÉNERGÉTIQUES DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène est très énergétique.

À masse égale, il libère environ 3 fois plus d'énergie que l'essence :

- 1 kg de pétrole = 12 kWh ;
- 1 kg d'hydrogène = 33 kWh.

Remarquons que cette énergie est dégagée dans des réactions chimiques, c'est-à-dire des réactions des atomes entre eux.

Si l'on regarde dans le noyau des atomes, les réactions ne sont plus chimiques mais nucléaires et l'ordre de grandeur des énergies impliquées est incommensurable.

Par exemple, 1 g d'uranium 235 contient une énergie égale à 1 MWj, soit 1 million de fois plus que le pétrole.

Malheureusement, à cause de sa faible masse volumique, H₂ occupe un volume très important.

Par rapport au pétrole, pour une même énergie dégagée, l'hydrogène occupe un volume :

- 3 000 fois plus grand à 1 bar (sous forme gazeuse) ;
- 6,7 fois plus grand à 700 bars (sous forme gazeuse) ;
- 4 fois plus grand sous forme liquide (température de – 253 °C et pression de 1 bar).

L'HYDROGÈNE : UNE MATIÈRE PREMIÈRE POUR L'INDUSTRIE ET UN VECTEUR ÉNERGÉTIQUE POUR LES MOBILITÉS

L'hydrogène dans l'industrie

Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement utilisé pour la synthèse de l'ammoniac qui est l'élément central dans la production d'engrais azotés. En effet, près de la moitié de l'hydrogène produit sert à la synthèse de l'ammoniac.

L'ammoniac est liquide à la température de – 33 °C.

Le stockage sous cette forme peut s'avérer dangereux, car lorsque la pression augmente, son mélange gazeux avec l'air peut devenir explosif. C'est la raison pour laquelle, dans l'industrie agricole, on utilise le nitrate d'ammonium pour apporter de l'azote au sol.

Les nombreuses autres utilisations seront déclinées au Chapitre 5.

Il s'agit principalement de :

- La synthèse des hydrocarbures, grâce aux procédés Sabatier et Fischer-Tropsch connus depuis le début du xx^e siècle.

Dans la période actuelle où nous entrons dans une ère de pénurie en gaz et en pétrole, à la fois pour des raisons structurelles (approche du *peak oil* et lutte contre le réchauffement climatique) et conjoncturelle

(guerre en Ukraine), la solution qui consiste à synthétiser des hydrocarbures permet d'une part d'assurer la transition vers des carburants décarbonés, d'autre part de recycler le CO₂ séquestré dans des procédures qui respectent la neutralité carbone.

- La désulfuration des hydrocarbures dans les raffineries, pour satisfaire aux réglementations en vigueur dans de nombreux pays.

- La production de chaleur et d'électricité pour l'industrie et les bâtiments.

- La production d'électricité à l'aide de piles à combustible pour réguler et stabiliser le réseau de distribution électrique.

L'hydrogène dans les mobilités terrestres, aériennes et spatiales (voir Chapitres 6 et 7)

Dans les mobilités terrestres ou aériennes, on utilisera des piles à combustible dont l'électricité produite à partir de l'hydrogène pourra actionner, par l'intermédiaire d'un moteur électrique, les roues d'un véhicule ou l'arbre d'une hélice.

L'hydrogène pourra être utilisé directement comme carburant à la place du kérosène dans la chambre de combustion d'un turboréacteur (3^e loi de Newton d'égalité de l'action et de la réaction) ou d'un turbopropulseur (rotation de l'arbre de la turbine pour actionner une hélice).

Enfin, du point de vue spatial, l'hydrogène liquide, par réaction avec l'oxygène liquide, est utilisé depuis longtemps dans la propulsion des fusées envoyées dans le voisinage de la Terre.

Pour des voyages plus lointains vers la planète Mars, il semblerait que la propulsion nucléaire thermique (NTP), utilisant l'hydrogène comme gaz propulsif, soit aujourd'hui la meilleure solution.

SÉCURITÉ LIÉE À L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE

Fragilisation métallique

Elle est due à la facilité de l'hydrogène, du fait de sa très faible densité (voir tab. 1.1), à pénétrer dans certains alliages métalliques en

endommageant la structure cristalline, rendant le matériau fragile et accélérant la propagation de microfissures, surtout sous contrainte.

Inflammation

La probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est très élevée, même si des précautions ont été prises pour éviter la présence d'une flamme ou d'une étincelle à proximité.

En revanche, en cas d'inflammation, le faible rayonnement de la flamme, qui se situe dans l'ultraviolet, limite considérablement les risques de propagation d'un incendie.

Explosion

Le caractère hautement inflammable de l'hydrogène engendre un risque supplémentaire d'explosion.

Cependant, la forte diffusivité de la molécule d'hydrogène due à ses très petites dimensions réduit le risque d'explosion en cas de fuite en milieu non confiné.

Lorsque la concentration en hydrogène dans l'air est comprise entre 10 et 60 %, il peut y avoir une détonation, ce qui constitue un risque supplémentaire par rapport à la simple déflagration, du fait de la très grande vitesse de propagation de l'onde de choc.

Enfin, il existe également un risque d'explosion lié aux équipements sous pression puisque l'hydrogène doit être fortement comprimé pour être stocké dans un volume restreint.

Au bilan, les risques d'explosion de l'hydrogène demeurent plus faibles que ceux du gaz naturel (voir tab. 1.2).

En outre, le caractère modérateur en cas d'incendie a pu être confirmé par des tests incendie où il a été démontré que l'inflammation d'une voiture à hydrogène avait beaucoup moins de conséquences du point de vue de la sécurité qu'une voiture à essence (voir fig. 1.6).

Dans ce test réalisé par une association de constructeurs automobiles, on compare l'inflammation d'un réservoir d'hydrogène à celle d'un réservoir d'essence, trois secondes et une minute après l'allumage.

À la fin de l'expérience, on constate que la température dans le véhicule à hydrogène n'a pas dépassé 47 °C au niveau des sièges arrière, alors qu'au bout d'une minute, la voiture à essence s'est totalement embrasée.

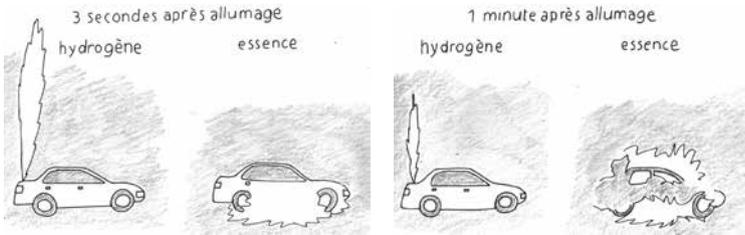


Figure 1.6 | Test incendie réalisé par des constructeurs d'automobiles à hydrogène.

Tableau 1.2 | Comparaison des propriétés de l'hydrogène et du méthane.

Propriétés	Hydrogène	Méthane
Pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg)	120 000	50 000
Densité gazeuse à 0 °C et 1 bar (kg/m ³)	0,09	0,65
Température de liquéfaction à 1 bar (°C)	- 253	- 162
Vitesse de flamme dans l'air (cm/s)	260 (verticale)	37
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	540
Coefficient de diffusion dans l'air (cm ² /s)	0,60	0,16
Énergie explosive théorique (kg TNT/m ³)	2	7

Deux accidents de référence liés à l'hydrogène

- L'incendie du Zeppelin Hindenburg (1937)
- L'accident nucléaire de Fukushima (2011)

L'incendie du Zeppelin Hindenburg

L'hydrogène véhicule, dans l'opinion publique, une image particulièrement négative.

Il tient cette mauvaise réputation d'un faisceau d'arguments provenant d'événements catastrophiques qui se sont imprimés durablement dans notre mémoire collective.

Prenons le cas de la bombe H dont la confusion avec les réactions chimiques de l'hydrogène relève d'une méconnaissance des principes fondamentaux de la physique.

Le deuxième exemple concerne l'accident du Zeppelin Hindenburg dans lequel l'hydrogène a effectivement une part importante de responsabilité.

Tout d'abord, l'appellation bombe à hydrogène (bombe H) a été donnée à la bombe atomique à fusion.

Le simple fait d'évoquer la bombe atomique nous rappelle les horreurs de la catastrophe d'Hiroshima.

Or il s'agissait d'une bombe A, c'est-à-dire à fission, alors que la bombe H, à fusion, est au moins 1 000 fois plus puissante.

Cependant dans la bombe H, il s'agit d'une réaction de fusion entre le deutérium et le tritium qui sont deux isotopes de l'hydrogène, c'est-à-dire une réaction nucléaire qui n'a strictement aucun rapport avec les réactions de l'hydrogène auxquelles nous sommes généralement confrontés, qui sont des réactions atomiques (ou chimiques) dont l'énergie mise en jeu est en ordre de grandeur au moins un million de fois plus faible !

Concernant le Zeppelin Hindenburg, rappelons brièvement les circonstances de l'accident.

Le Zeppelin Hindenburg était un dirigeable de 247 m de long et 45 m de hauteur dont l'enveloppe était gonflée à l'hydrogène pour la sustentation, doté de 4 moteurs diesel à hélice pour la propulsion et d'une nacelle extérieure pour l'habitacle du personnel navigant et des passagers (voir fig. 1.7).

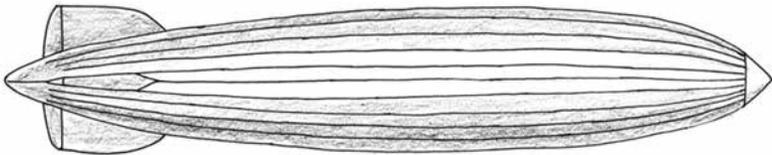


Figure 1.7 | Schéma du dirigeable Zeppelin Hindenburg.



Figure 1.8 | Début de l'incendie du LZ 129 Hindenburg.

Le 6 mai 1937, le dirigeable approcha de son point d'atterrissage, dans le New Jersey, après un vol transatlantique sans histoire.

Au moment d'atterrir, une fuite d'hydrogène apparut à l'arrière du dirigeable et il suffit d'une étincelle, probablement déclenchée par une décharge électrique sur la carlingue, pour provoquer un départ de feu qui se propagea le long de l'enveloppe du dirigeable (voir fig. 1.8).

Au bilan, il y eut 35 morts sur 97 personnes à bord.

Cette catastrophe sonna le glas de l'industrie du ballon dirigeable dans le monde.

L'hydrogène avait évidemment une responsabilité dans l'accident, mais il semblerait que la propagation de l'incendie fut plutôt due à la peinture de l'enveloppe qui s'enflamma.

L'hélium, gaz ininflammable, aurait à l'évidence présenté moins de risques que l'hydrogène, mais ce gaz était trop rare, trop cher et possédait de moins bonnes performances de sustentation.

L'accident nucléaire de Fukushima

Afin de restaurer une vérité scientifique généralement méconnue du grand public, il est nécessaire de préciser que les rares explosions de réacteurs nucléaires qui survinrent dans l'histoire du nucléaire

civil et qui firent sensation dans les médias étaient principalement dues à l'hydrogène.

En effet, il s'avère qu'un réacteur nucléaire, de par sa conception, ne peut en aucune manière exploser comme une bombe atomique.

Par exemple, sur nos REP (ou PWR), qui sont faiblement enrichis en uranium 235, on observe un phénomène d'autoprotection appelé « effet Doppler » qui s'oppose à toute augmentation de la puissance du réacteur en cas d'accident.

Il existe bien sûr d'autres phénomènes intrinsèques au réacteur qui démontrent l'impossibilité d'une explosion nucléaire, mais les explications les concernant sortent du cadre de l'ouvrage. On pourra consulter des ouvrages plus spécialisés dans la sûreté nucléaire (voir Bibliographie en Annexe).

La plupart du temps, lorsqu'il y a une explosion sur un réacteur nucléaire, cela est dû à une réaction entre l'hydrogène, produit dans le cœur qui a commencé à fondre, et l'oxygène de l'air.

À ce jour, seulement trois réacteurs de puissance ont connu une fusion (complète ou partielle) du cœur et pour deux d'entre eux, cela aboutit à une explosion d'hydrogène : Tchernobyl (1986, URSS) et Fukushima (2011, Japon).

Prenons l'exemple de la centrale nucléaire de Fukushima.

Le 11 mars 2011, il y eut un séisme extrême d'une magnitude 9 sur l'échelle de Richter avec un épïcêtre à 130 km à l'est de la côte du Japon qui provoqua des dégâts majeurs sur 600 kilomètres de côte et 10 km de profondeur à l'intérieur des terres.

En particulier, le réseau électrique qui desservait la centrale fut détruit.

Les réacteurs résistèrent correctement au séisme en s'arrêtant automatiquement grâce à leur système d'arrêt d'urgence conformément aux règles de conception.

L'accident proprement dit survint 50 minutes plus tard lorsque la plus grosse vague du tsunami consécutif au séisme, de 15 m de haut, submergea la digue mal dimensionnée.

Des débris vinrent obstruer l'entrée de l'eau tertiaire de refroidissement de la station de pompage (perte de la source froide) de plusieurs réacteurs et l'eau de mer noya les diesels de secours, les rendant inopérants (perte totale des alimentations électriques).

Le tableau 1.3 donne la chronologie de l'accident sur les réacteurs 1, 2 et 3.

Tableau 1.3 | Chronologie de l'accident sur les réacteurs 1, 2 et 3 de Fukushima.

	Réacteur 1	Réacteur 2	Réacteur 3
Perte du réseau d'alimentation électrique	+ 51 min	+ 54 min	+ 52 min
Perte de la source froide	+ 1 heure	+ 70 heures	+ 36 heures
Niveau d'eau au sommet du combustible	+ 3 heures	+ 74 heures	+ 42 heures
Début des dommages sur le cœur	+ 4 heures	+ 77 heures	+ 44 heures
Dommages sur la cuve	+ 11 heures	?	?
Utilisation des pompes incendie avec de l'eau douce	+ 15 heures	?	+ 43 heures
Explosion hydrogène	+ 25 heures	+ 87 heures	+ 68 heures
Utilisation des pompes incendie avec de l'eau de mer	+ 28 heures	+ 77 heures	+ 46 heures
Rétablissement du réseau électrique	+ 11-15 jours	+ 11-15 jours	+ 11-15 jours
Rétablissement du refroidissement du cœur	+ 14-15 jours	+ 14-15 jours	+ 14-15 jours

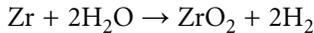
Si l'on se focalise sur le réacteur 1, on observe que la perte de refroidissement correspond à la perte de la source froide (+ 1 heure après l'occurrence du séisme).

Le réacteur était arrêté mais il dégageait néanmoins de la puissance résiduelle (provoquée par la radioactivité des produits de

fission accumulés dans le cœur du réacteur nucléaire) qui, bien que ne représentant que quelques % de la puissance nominale du réacteur, ne pouvait pas être évacuée.

À cause de la vaporisation de l'eau du cœur qui montait en température, le niveau d'eau s'abassa jusqu'au dénoyage du cœur qui commença à fondre (+ 4 heures).

Les gaines de combustible en zirconium réagirent avec la vapeur d'eau en provoquant un dégagement d'hydrogène selon la réaction :



Enfin, lorsque les opérateurs ouvrirent des vannes d'évents pour laisser échapper les gaz de fission et l'hydrogène vers l'extérieur du bâtiment afin d'éviter des surpressions dangereuses dans l'enceinte de confinement, le contact de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air provoqua une explosion (+ 25 heures) d'une violence telle que l'incendie qui s'ensuivit pouvait être visible à des dizaines de kilomètres de distance (voir fig. 1.9).

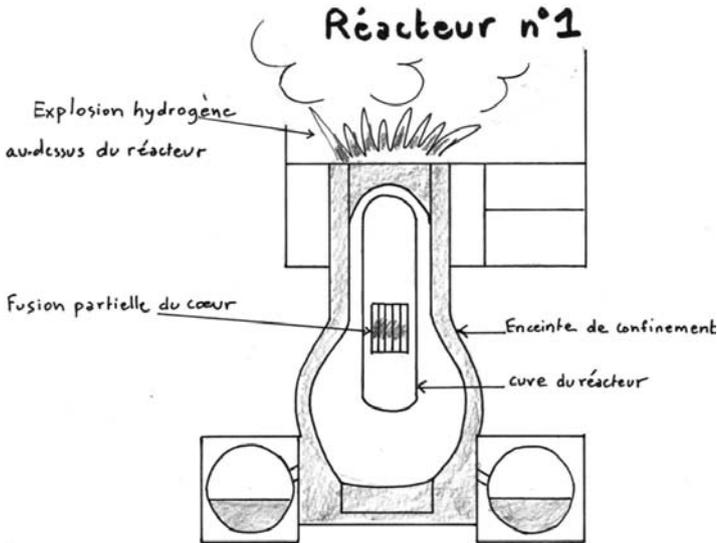


Figure 1.9 | Explosion hydrogène sur le réacteur n° 1 de Fukushima le 12 mars 2011.

Rappelons que l'accident de la centrale de Fukushima ne provoqua aucune victime et que les 18 000 morts de « Fukushima » ont été causées par le séisme et le tsunami sur des populations généralement très éloignées de la centrale.

Conclusion sur les propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène possède 3 aptitudes exceptionnelles :

- une grande densité d'énergie : 1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie que 3 kg de pétrole ;
- une combustion dans l'air avec production d'eau pure sans polluants toxiques ni gaz à effet de serre ;
- une implication active dans les deux procédés industriels suivants, inverses l'un de l'autre, qui sont à zéro émission de carbone :
 - l'électrolyse pour produire un hydrogène « vert » à partir d'une électricité décarbonée,
 - la pile à combustible pour produire une électricité décarbonée à partir d'un hydrogène « vert ».

Cependant, sa faible densité entraîne des risques spécifiques :

- Il faut le transporter dans les mobilités terrestres à l'état gazeux sous forte pression pour en limiter l'encombrement, ce qui entraîne les risques associés aux appareils soumis à la très forte pression.
- Il peut fragiliser certains métaux en endommageant leur structure cristalline. Il sera alors nécessaire de sélectionner, en cas de contacts prolongés avec l'hydrogène, des matériaux peu sensibles à cette fragilisation, comme les alliages d'aluminium ou les aciers inoxydables.

Finalement, l'hydrogène est moins dangereux que le gaz de ville (méthane) qui est la cause d'explosions très fréquentes, dans les habitations ou dans les sites industriels, consécutivement au dysfonctionnement d'une chaudière à gaz ou à une installation défectueuse.

En outre, le méthane produit par combustion du dioxyde de carbone (CO₂) qui est le gaz à effet de serre de référence et de l'eau, mais également du monoxyde de carbone qui est un gaz asphyxiant très toxique.

L'hydrogène, quant à lui, ne produit par combustion que de l'eau pure.

En revanche, il pose des problèmes de sécurité liés au risque d'explosion en présence d'air (oxygène) et à sa facilité d'auto-inflammation.

Les explosions peuvent être spectaculaires, à l'instar de l'accident de Fukushima.

L'accident du Zeppelin Hindenburg a montré comment une simple étincelle a pu déclencher un début d'incendie qui a abouti à une catastrophe.

En revanche, sa forte diffusivité et le faible rayonnement de sa flamme limitent l'impact d'un départ de feu comme en témoigne le test incendie effectué sur une voiture à hydrogène, comparativement à une voiture à essence.

2

Les « gisements d'hydrogène » n'existent pas

Selon la théorie communément admise, le noyau de l'atome d'hydrogène, le proton, apparut au début de la nucléosynthèse primordiale, quelques minutes seulement après le Big Bang qui remonte à 13,7 milliards d'années.

La température de l'univers était alors d'un milliard de kelvins.

Il fallut attendre 380 000 ans pour que sa température tombât à 3 000 K.

Il y eut alors un découplage entre la matière et l'énergie (les photons).

Ces derniers se propagèrent dans l'univers qui devint subitement transparent, c'est-à-dire visible.

La lumière fut ainsi libérée en tout point de l'espace et elle peut aujourd'hui être détectée par nos télescopes : c'est le « rayonnement fossile » découvert par Wilson et Penzias en 1964.

Il témoigne du bien-fondé de la théorie du Big Bang.

Enfin les électrons purent être interceptés par les noyaux d'hydrogène et d'hélium et graviter autour d'eux : ce fut la naissance des premiers atomes qui se combinèrent ensuite entre eux progressivement, à mesure que la température de l'univers décroissait, pour donner des molécules.

L'hydrogène est aujourd'hui l'élément le plus abondant dans l'univers (75 % en masse).

Cependant, dans la croûte terrestre, il ne représente que 0,22 % des atomes et dans l'atmosphère, que 0,55 ppm ($5,5 \cdot 10^{-7}$) des gaz.

En revanche, il est très présent dans les océans, mais associé à l'oxygène au sein de la molécule d'eau.

Aussi n'existe-t-il pas de « gisement d'hydrogène » et pour l'exploiter, sous forme gazeuse ou liquide, il faut d'abord le produire par des procédés industriels.

C'est l'objet du présent chapitre.

GÉNÉRALITÉS SUR LA PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE

On produit l'hydrogène principalement à partir de l'énergie fossile.

Il s'agit des procédés de vaporeformage, d'oxydation partielle, de reformage autothermique ou de gazéification du charbon.

On peut également le produire à partir des énergies renouvelables ou de l'énergie nucléaire : électrolyse de l'eau, gazéification de la biomasse ou craquage de l'eau, par thermolyse ou radiolyse (voir fig. 2.1).

Plusieurs événements nous incitent à renoncer progressivement aux énergies fossiles et à nous orienter vers les énergies renouvelables ou l'énergie nucléaire.

Parmi ces événements, citons le réchauffement climatique et l'atteinte du pic de production de pétrole (*peak oil*) qui sont des causes structurelles.

Ajoutons l'événement conjoncturel de la guerre en Ukraine.

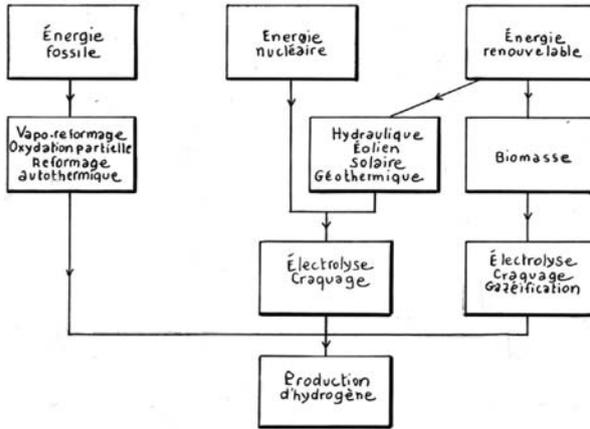


Figure 2.1 | Les filières de production de l'hydrogène.

Le réchauffement climatique

Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), l'Homme est responsable du réchauffement actuel de notre planète. On parle de réchauffement anthropique provoqué par des gaz à effet de serre émis par l'activité humaine.

Une partie de la lumière du soleil traverse l'atmosphère et atteint la Terre.

Le sol ainsi chauffé émet des rayons infrarouges dont une partie est retenue dans l'atmosphère par des gaz dits à effet de serre (voir fig. 2.2).

Ces gaz existent naturellement dans l'atmosphère depuis des millions d'années, mais leur taux a augmenté sensiblement depuis le début de l'ère industrielle.

L'effet de serre est nécessaire à la vie sur Terre.

En effet, sans lui, la température moyenne à la surface du globe serait de -18°C au lieu des $+15^{\circ}\text{C}$ dont nous bénéficions aujourd'hui.

La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et quelques autres gaz à effet de serre (GES) contenus dans l'atmosphère agissent comme la serre du jardinier : en empêchant une partie

de l'énergie solaire reçue par la Terre de repartir dans l'espace, ils maintiennent une température moyenne clémente autour de notre planète.

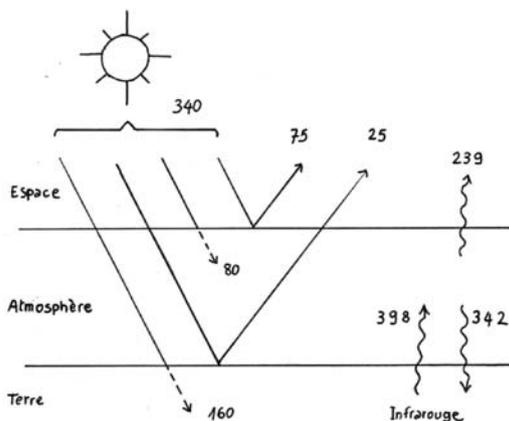


Figure 2.2 | Bilan radiatif de la Terre (W/m^2) et émission de rayons infrarouges.

Depuis des centaines de milliers d'années, le climat enchaîne des périodes glaciaires (froides) et interglaciaires (chaudes).

On observe sur la figure 2.3 que les périodes glaciaires sont espacées d'environ 120 000 ans et qu'elles alternent avec des périodes interglaciaires qui durent entre 10 000 et 20 000 ans.

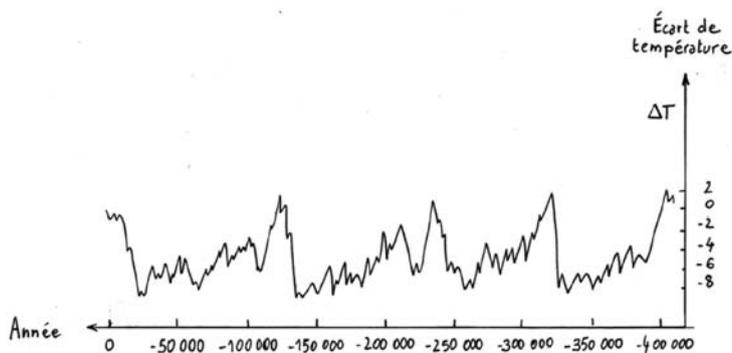


Figure 2.3 | Écarts de température moyenne à la surface de la Terre depuis 400 000 ans par rapport à aujourd'hui.

Nous savons que ces écarts de températures millénaires ont une explication purement mécanique liée à la variation des 3 paramètres de Milankovic (voir fig. 2.4).

- L'excentricité, liée à la variation de l'aplatissement de la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil. Lorsque l'ellipse est très aplatie, nous sommes dans une période glaciaire ; lorsque l'ellipse se rapproche du cercle, nous sommes dans une période interglaciaire.

- Les 2 autres paramètres, dont l'influence sur le climat est moindre, sont :

- l'obliquité, liée à la variation de l'inclinaison de la Terre par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique ;

- la précession, liée à la rotation de l'axe des pôles à la manière d'une toupie.

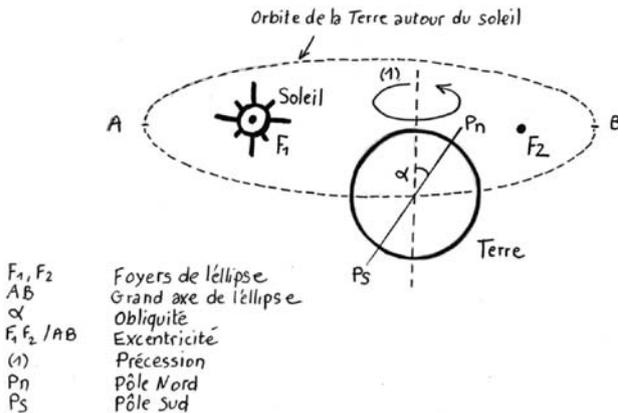


Figure 2.4 | Les paramètres de Milankovic : excentricité, obliquité et précession.

Les variations des températures millénaires ne sont donc pas liées à l'effet de serre, mais à l'interaction gravitationnelle de la Terre avec les autres planètes du système solaire.

Cependant, depuis le milieu du XIX^e siècle, la température globale moyenne à la surface de la Terre s'est anormalement élevée d'un peu plus de 1 °C alors qu'en l'espace de 200 ans, les paramètres de Milankovic n'ont pas eu le temps d'évoluer.

Il s'agit cette fois-ci d'un réchauffement dû aux gaz à effet de serre.

Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines ont généré une hausse significative des GES dans l'atmosphère.

Ainsi, en 150 ans, à cause de la combustion des énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) et de la déforestation à grande échelle, le taux de dioxyde de carbone a crû de 30 %.

Au cours de cette même période, en raison de la poussée démographique et de l'intensification de l'agriculture et de l'élevage, la concentration en méthane a augmenté de 145 %. L'Homme a ajouté en 250 ans autant de gaz à effet de serre (hors vapeur d'eau) que la nature en a produit en plusieurs milliers d'années.

Depuis 400 000 ans, jamais les taux de dioxyde de carbone n'ont été aussi élevés.

Si rien n'est fait pour limiter l'envolée des GES, de profonds bouleversements climatiques sont d'ores et déjà prévisibles.

Selon les scénarios extrêmes du GIEC, on pourrait assister, d'ici à la fin du siècle, à une élévation de la température globale moyenne de plus de 4 °C, entraînant une élévation du niveau des océans de l'ordre de grandeur du mètre à l'horizon 2100 qui par conséquent provoquerait la modification de certains contours continentaux par submersion de zones côtières (Bangladesh, Pays-Bas, delta du Nil, Camargue, Floride...).

Cette élévation du niveau des océans est due pour 1/3 à la dilatation de l'eau de mer et, pour 2/3, au début de la fonte de glaciers continentaux et des calottes glaciaires polaires.

Les climatologues s'attendent également à une intensification des fluctuations climatiques, avec une multiplication d'épisodes de grands froids et de canicules, de périodes de sécheresse et de pluies, et une fréquence accrue des catastrophes naturelles. Les précipitations devraient s'accroître dans le Nord tandis qu'elles devraient chuter de façon alarmante dans le Sud, dans des régions déjà touchées par la désertification.

Cependant, il faut savoir raison garder.

Le pire n'est pas toujours certain et il semblerait que le scénario le plus probable aboutisse plutôt à une élévation de la température de l'ordre 3 °C à la fin du siècle par rapport au niveau préindustriel.

Les phénomènes climatiques et météorologiques ne se mesurent pas dans la même échelle de temps.

Alors que le climat varie sur des échelles de temps qui vont des années aux milliards d'années de l'histoire de la Terre, les phénomènes météorologiques, quant à eux, ont une durée de vie de l'ordre de plusieurs mois ou, au pire, de l'année.

Par ailleurs, contrairement aux phénomènes climatiques, les phénomènes météorologiques sont par nature chaotiques. Cela est dû au fait que l'équation de Navier-Stokes qui régit les phénomènes météorologiques n'est pas linéaire et de ce fait, l'évolution d'un phénomène est très sensible aux conditions initiales.

C'est cette non-linéarité qui explique l'impossibilité de prévoir la météo en un endroit donné à plus de quelques jours, quelles que soient la précision des calculs et la puissance des ordinateurs utilisés.

Ce phénomène est connu sous l'expression métaphorique et distractive d'« effet papillon », pour la première fois formulée par le météorologue Edward Lorenz en 1972, selon lequel le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut provoquer, du fait de la modification thermodynamique qu'il occasionne, une tornade au Texas quelques mois plus tard.

En conséquence, des phénomènes météorologiques extrêmes comme une canicule ou un grand froid peuvent survenir de manière chaotique et être totalement déconnectés des considérations climatiques. En revanche, il peut fort bien se faire qu'une modification climatique favorise le déclenchement d'un phénomène météorologique extrême.

En conclusion, il faut se garder de déductions trop hâtives et avoir conscience qu'un phénomène météorologique extrême, souvent

multifactoriel, nécessite une analyse approfondie avant d'en déduire une explication solidement argumentée.

Au bilan, l'humanité n'est pas menacée dans son existence, mais il est nécessaire que l'Homme prenne conscience des changements climatiques inéluctables à venir afin qu'il agisse au mieux pour limiter au maximum les conséquences de son activité sur le climat et pour s'adapter aux situations nouvelles qui surviendront inexorablement, par exemple en repensant l'urbanisme afin de limiter l'emprise du béton au profit de la végétalisation des villes ou en construisant des digues pour protéger les villes en bordure de mer contre la montée des eaux et la canaliser, le cas échéant, vers des zones inhabitées.

Bien entendu, les actions prioritaires à mener au plan industriel sont la réduction des émissions de dioxyde de carbone et l'augmentation de l'efficacité énergétique (ou intensité énergétique, qui est une économie d'énergie sans privation, contrairement au terme à la mode de « sobriété »).

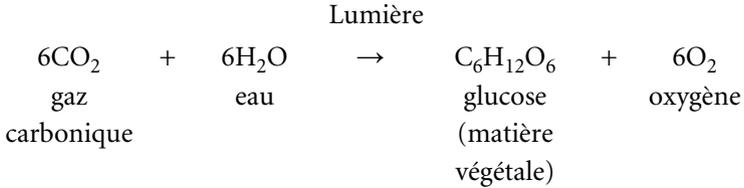
L'objectif annoncé en 2015 à la COP 21 de Paris de limiter le réchauffement global à 1,5 °C en 2100 par rapport à la période préindustrielle est illusoire, car la moitié du CO₂ émis actuellement restera au moins un siècle dans l'atmosphère avant de se recombinaison et, par ailleurs, les États-Unis et la Chine, qui sont à eux deux responsables de près de la moitié des émissions de CO₂ au plan mondial, n'envisagent pas pour l'instant de mesures drastiques susceptibles de les faire changer de paradigme.

Une nouvelle notion a été introduite par le Parlement européen, afin de se fixer un objectif de réduction des émissions de carbone à l'horizon 2050.

Il s'agit de la neutralité carbone, dont la définition proposée est « l'équilibre entre les émissions de carbone et l'absorption du carbone de l'atmosphère par les puits de carbone ».

Une des actions consiste à décarboner la production d'énergie avant 2050 grâce au recours aux énergies renouvelables et nucléaire.

Il est à noter qu'on suppose, ce qui au demeurant est contestable, que le recours à la biomasse respecte la neutralité carbone, car il y aurait équilibre entre les émissions de carbone provenant de la biomasse et l'absorption du carbone de l'atmosphère dans la matière végétale par le processus chimique de photosynthèse suivant :



Dans la suite de l'ouvrage, nous ferons donc l'hypothèse que l'énergie provenant de la biomasse respecte la neutralité carbone, à l'instar des hydrocarbures de synthèse lorsqu'ils sont produits par la réaction de l'hydrogène avec le CO₂ extrait de l'atmosphère.

Le pic de production de pétrole

Lorsque l'on a démarré la production industrielle de pétrole à la fin du XIX^e siècle, on est parti de la production 0, c'est une lalalissade. Lorsqu'on produira la dernière goutte de pétrole, on retombera à une production 0. Entre ces deux extrêmes, on passera forcément par une production maximum : c'est le pic de production de pétrole (ou *peak oil*).

Dans les années 1950, un géologue nommé King Hubbert prédit le pic de production de pétrole des États-Unis à l'année 1970, ce qui se confirma avec une précision remarquable et rendit son modèle mathématique subitement célèbre. Il a la forme d'une cloche qui ressemble étrangement à une courbe de Gauss (voir fig. 2.5) et son corollaire est que lorsqu'on a atteint le pic, on a épuisé la moitié des réserves disponibles.

Le modèle de Hubbert prévoit la date du pic de production de pétrole pour un pays, un groupe de pays ou l'ensemble des pays du monde.

L'atteinte du pic est inéluctable mais la question est de savoir quand elle surviendra.

On observe sur la figure 2.5 la courbe en cloche du modèle théorique de Hubbert et les productions mondiales mesurées jusqu'en 2002. À partir de 2002, les prévisions divergent d'un organisme à l'autre :

- L'AIE (Agence internationale de l'énergie) ne prévoyait aucun pic avant 2030. Elle se fondait, sans analyse préalable, sur les données fournies par les pays producteurs de pétrole forcément subjectives.
- Le pétrolier Shell prévoyait un plateau entre 2025 et 2045.
- L'ASPO (Association pour l'étude des pics de production de pétrole), composée d'experts géologues et d'anciens responsables de compagnies pétrolières, prévoyait, quant à elle, un pic vers 2015 avec une production de l'ordre de 85 millions de barils par jour.

Il s'avère que l'analyse ci-dessus faite en 2002 est parfaitement compatible avec les informations compilées vingt ans plus tard.

Simplement, les évaluations actuelles considèrent un « plateau » plutôt qu'un « pic » (dû principalement à l'exploitation des gaz et pétrole de schiste), qui s'étendrait approximativement de 2025 à 2035, ce qui rejoint de façon remarquable les prévisions faites en 2002 par la compagnie Shell.

Ainsi, si l'on exclut les prévisions de l'AIE *a priori* irréalistes, nous pouvons conclure que nous sommes dans la proximité du « pic » et que, par conséquent, nous devons impérativement nous préparer dès aujourd'hui à la période de l'après pétrole.

En d'autres termes, la nécessité de remplacer les énergies fossiles par les énergies décarbonées s'impose sans tarder car nous entrons dans une période proche de l'après pic où la production ne pourra plus satisfaire la demande, ce qui entraînera inéluctablement une flambée des prix.

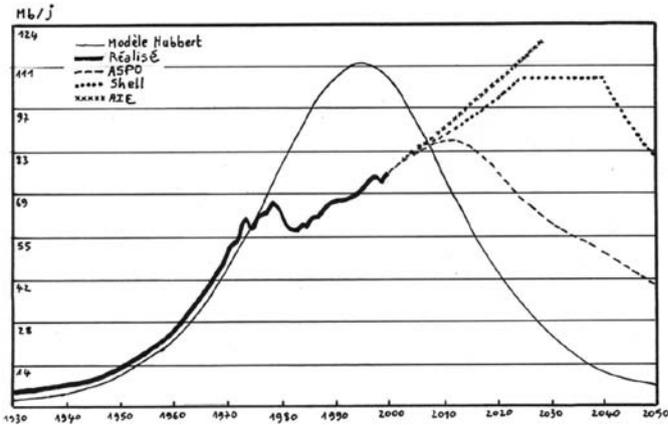


Figure 2.5 | Différents scénarios de prévisions, faites l'année 2002, sur l'évolution de la production mondiale de pétrole en million de barils par jour (Mb/j).

La guerre en Ukraine

Le troisième événement, d'origine conjoncturelle, nous obligeant à délaisser au plus vite les énergies fossiles, est le conflit en Ukraine et la menace par la Russie d'interrompre les exportations de gaz (et de pétrole) vers les pays de l'OTAN.

Afin d'éviter une pénurie de gaz dès l'hiver 2022/2023 aux conséquences imprévisibles, nous cherchons d'autres fournisseurs, dont les États-Unis qui nous livrent du GNL (gaz naturel liquéfié) issu du gaz de schiste américain.

Il est regrettable que nous n'ayons pas su anticiper cette situation de dépendance, alors que la France est probablement le pays qui possède, avec la Pologne, les plus grandes réserves d'Europe en gaz et en pétrole de schiste.

Ce gaz est issu de la roche mère située à quelque 2 000 mètres de profondeur, bien au-dessous des nappes phréatiques.

Les techniques d'extraction, basées sur le forage horizontal et la fracturation hydraulique (voir fig. 2.6), consistent à injecter de l'eau sous pression additionnée à du sable et des agents chimiques de manière à créer des fractures d'où le gaz peut s'échapper puis être récupéré.

Initialement critiquées eu égard à leur impact dommageable sur l'environnement, les techniques d'extraction disponibles à présent ont suffisamment progressé pour être devenues acceptables pour notre écosystème.

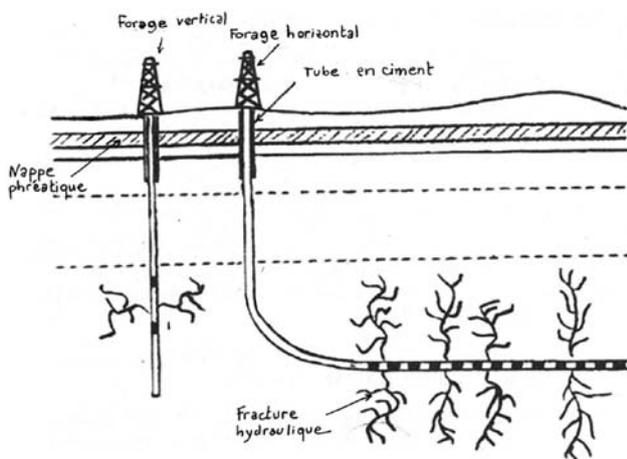


Figure 2.6 | Extraction du gaz de schiste et fracturation hydraulique.

En outre, nous aurions pu également, dans un souci légitime de recherche de l'indépendance énergétique, mettre en place une infrastructure opérationnelle pour produire des hydrocarbures de synthèse, selon le procédé Fischer-Tropsch connu depuis un siècle (voir chapitre 6), qui aurait respecté, comme il a été dit plus haut, la neutralité carbone.

Pour l'anecdote, les Allemands utilisèrent ce procédé pendant la Seconde Guerre mondiale pour produire, à partir du charbon, l'essence qu'ils ne pouvaient obtenir naturellement faute de gisement de pétrole sur leur territoire national. Ils purent ainsi subvenir aux besoins de l'aviation et de l'armée nazie engagées dans la guerre.

Dans la période actuelle, de fortes tensions sur les approvisionnements d'hydrocarbures, tant à cause de la nécessité d'une transition rapide vers les énergies décarbonées que de la menace d'une pénurie

à très court terme, la France a besoin de toutes les énergies primaires, qu'elles soient fossiles, fissiles ou renouvelables, et notamment du gaz qui est l'énergie fossile la plus rentable et la moins polluante et qui, de surcroît, représente 16 % du bilan énergétique national.

L'identité de Kaya

On ne change pas une valeur en la multipliant et divisant par un même nombre.

Ainsi, en appelant :

- CO_2 , les émissions anthropiques mondiales de CO_2 ;
- TEP (tonne équivalent pétrole), la quantité d'énergie consommée dans le monde ;
- PIB, le produit intérieur brut ;
- POP, la population mondiale.

Alors, on peut écrire :

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

$\frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}}$ est l'intensité carbone d'une énergie. Elle mesure le contenu en GES de l'énergie.

$\frac{\text{TEP}}{\text{PIB}}$ est l'intensité énergétique de l'économie. Elle mesure la quantité d'énergie qu'il faut dépenser pour produire une unité de biens ou services.

$\frac{\text{PIB}}{\text{POP}}$ est la production par personne. Elle mesure la richesse moyenne mondiale.

Selon le GIEC, l'objectif de 1,5 °C à l'horizon 2100 nécessite d'atteindre la neutralité carbone en 2050, c'est-à-dire qu'on aura, à cette date, cessé d'enrichir l'atmosphère en CO_2 , grâce à une compensation exacte entre son émission dans l'atmosphère et sa disparition par absorption sur terre (production végétale par photosynthèse) et sur mer (dissolution dans l'eau de mer).

Il s'avère que la contribution de l'intensité carbone sera nettement insuffisante pour équilibrer l'équation de Kaya, car la faible densité énergétique des énergies renouvelables ne permettra pas d'assurer, loin s'en faut, le remplacement des énergies fossiles dans un délai suffisamment court.

Quant à l'énergie nucléaire, les mauvaises décisions politiques de la fin du ^{xx}e siècle, qui ont abouti à un frein programmé du développement du nucléaire, rendent aujourd'hui son recours inopérant étant donné le temps nécessaire pour le réactiver.

En ce qui concerne l'intensité énergétique, sa contribution à l'équilibre de l'équation de Kaya est également nettement insuffisante, car une amélioration de 2 % par an sur les 30 prochaines années est le maximum que l'on puisse espérer.

En conséquence, le terme prépondérant pour tenter d'équilibrer l'équation de Kaya est la production par personne, c'est-à-dire la richesse mondiale.

Selon le GIEC, l'objectif de 1,5 °C en 2100, qui correspond à la neutralité carbone en 2050, nécessite que l'on abaisse le PIB de 7 % par an pendant 30 ans, c'est-à-dire qu'on maintienne pendant 30 ans la même situation économique que celle qu'on a connue en 2020 pendant la période de confinement !

Cette situation est bien entendu surréaliste.

Si l'on se fixe de façon plus raisonnable un objectif d'augmentation de la température globale moyenne de + 3 °C à l'horizon 2100 par rapport à la période préindustrielle, nous disposons d'une marge de manœuvre moins coercitive.

Néanmoins, un appauvrissement durable de l'économie mondiale sera incontournable.

Du fait de l'épuisement des réserves en hydrocarbures, cet appauvrissement sera d'autant plus brutal que l'on tardera à prendre les bonnes décisions pour décarboner notre industrie.

En effet, nous sommes piégés entre le marteau et l'enclume : si nous ne décarbonons pas assez vite, nous manquerons d'énergies, une fois

dépassé le *peak oil*, pour assurer notre développement industriel, d'où une baisse du PIB. Si nous décarbonons trop vite, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire ne suffiront pas à compenser la baisse des énergies fossiles, d'où un même appauvrissement généralisé.

Le temps des Trente Glorieuses est depuis longtemps révolu et l'Homme doit s'habituer à la « sobriété », c'est-à-dire à la privation, et à la triste perspective de difficultés économiques grandissantes pour les prochaines générations.

PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE UTILISANT L'ÉNERGIE FOSSILE

Actuellement, la production d'hydrogène est assurée à 96 % par les combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon).

Ils permettent une production de masse peu coûteuse destinée à l'industrie.

Les trois procédés les plus utilisés sont le vaporeformage du gaz naturel, l'oxydation partielle de résidus de pétrole et la gazéification du charbon (voir fig. 2.7).

Ces techniques ont toutes l'inconvénient de produire du CO₂ donc de contribuer au réchauffement climatique.

Seule l'électrolyse, qui représente seulement 4 % de la production totale, ne dégage pas de CO₂. Nous verrons ce procédé au § « Procédés de production de l'hydrogène utilisant les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire », plus loin dans ce chapitre.

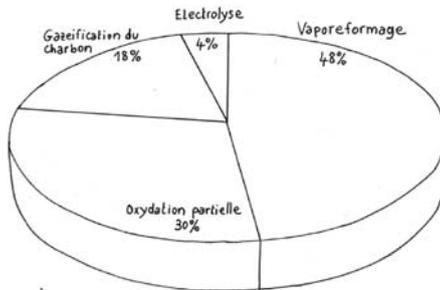


Figure 2.7 | Répartition des procédés utilisés pour la production d'hydrogène en 2020.

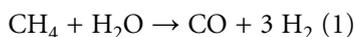
Le vaporeformage

On fait réagir des hydrocarbures avec de l'eau pour produire de l'hydrogène.

C'est le procédé le plus courant au niveau industriel.

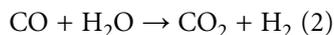
Il est mis en œuvre principalement avec des hydrocarbures légers : méthane, naphta ou GPL (gaz de pétrole liquéfié).

Lors du vaporeformage du méthane, la vapeur d'eau réagit sur l'hydrocarbure pour produire du gaz de synthèse selon la réaction :



Cette opération s'effectue à pression modérée (20 à 30 bars) et à une température de l'ordre de 900 °C, en présence d'un catalyseur de nickel.

On fait ensuite réagir le CO avec la vapeur d'eau (*Water Gas Shift*) :



Au bilan, les réactions (1) et (2) donnent :



Cette réaction est endothermique.

Le processus global est schématisé sur la figure 2.8.

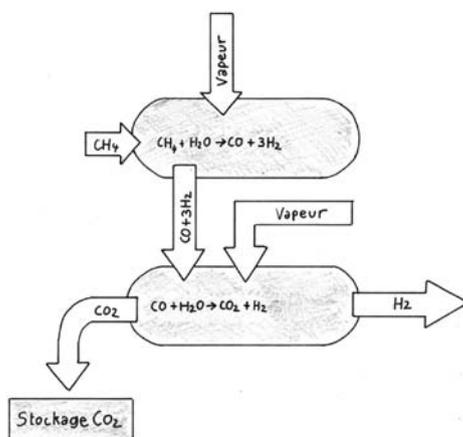
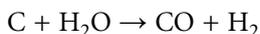


Figure 2.8 | Le vaporeformage du méthane.

Enfin, il se produit des réactions conduisant à la production de suies qui sont des carbones purs.

On peut alors les éliminer en partie par la réaction :



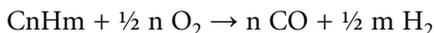
L'oxydation partielle

En présence d'oxygène, des résidus d'hydrocarbures peuvent être convertis en hydrogène et oxyde de carbone.

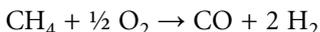
L'oxydation partielle est plus contraignante que le vaporeformage en termes d'investissement et de techniques opératoires.

Afin d'en diminuer le coût, on utilise des hydrocarbures peu coûteux.

La réaction générale est :



En faisant $n = 1$ et $m = 4$, on obtient la réaction du méthane avec l'oxygène :

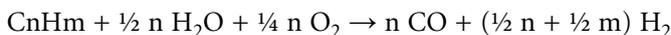


La réaction est exothermique.

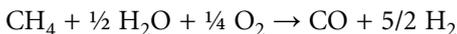
On utilise de l'oxygène en quantité insuffisante pour que l'oxydation ne soit que partielle. L'oxygène est utilisé à haute température (de 1 200 à 1 500 °C) et sous forte pression (de 20 à 90 bars) en présence de vapeur d'eau pour modérer la réaction.

Le reformage autothermique

Le vaporeformage est endothermique alors que l'oxydation partielle est exothermique. On peut donc effectuer simultanément les deux réactions dans une proportion telle que la réaction soit autothermique, c'est-à-dire qu'elle se déroule sans dégagement ni absorption de chaleur.



En faisant $n = 1$ et $m = 4$, on obtient :



La gazéification du charbon

On utilise le terme de « gazéification » pour les combustibles solides comme le charbon ou la biomasse.

C'est un procédé d'oxydation partielle.

Il existe 3 technologies de gazéification :

- la technologie sur lit fixe ;
- la technologie sur lit fluidisé ;
- la technologie à lit forcé.

La figure 2.9 représente la technologie sur lit fixe.

Les gaz circulent au travers de particules de charbon dont les dimensions varient de 3 à 30 mm.

La température est comprise entre 800 et 1 000 °C et la pression, entre 10 et 100 bars.

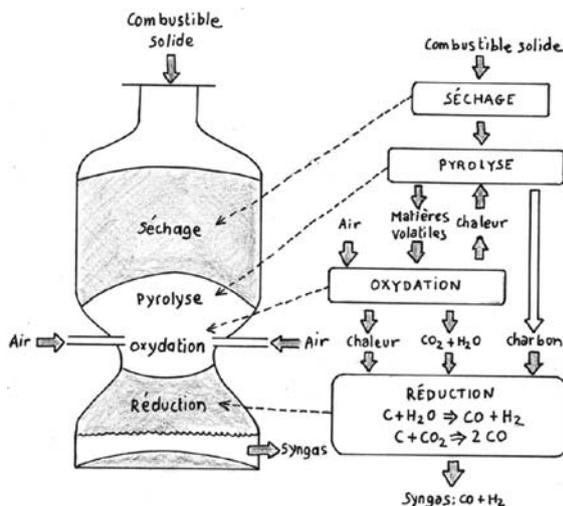


Figure 2.9 | Procédé de gazéification du charbon (C) à lit fixe.

Séquestration du CO₂

La production d'hydrogène à partir d'hydrocarbure et de charbon génère du gaz carbonique, de l'ordre de 10 tonnes de CO₂ par tonne d'hydrogène produit par vaporeformage du méthane, de 12 à

15 tonnes pour l'oxydation partielle de résidus de pétrole et de 16 à 19 tonnes dans le cas de la gazéification du charbon.

Si le CO₂ est libéré dans l'atmosphère, on perd une grande partie du bénéfice procuré par l'utilisation de l'hydrogène dans la lutte contre le réchauffement climatique.

C'est la raison pour laquelle des études sont menées pour trouver des solutions de séquestration du gaz carbonique.

Cependant, il faut prendre en compte le fait que le captage de celui-ci et, le cas échéant, son acheminement s'il n'est pas stocké sur place, sont des opérations qui coûtent de l'énergie, et diminuent de 20 à 30 % le rendement de l'hydrogène ainsi produit.

Les différentes techniques envisagées permettent de stocker le CO₂ sur de très longues périodes, par exemple jusqu'à plusieurs milliers d'années dans des sites géologiques.

C'est la solution qui semble être la plus intéressante.

Il s'agit de réservoirs d'hydrocarbures anciens ou en exploitation, de mines de charbon désaffectées ou d'aquifères salins (voir fig. 2.10).

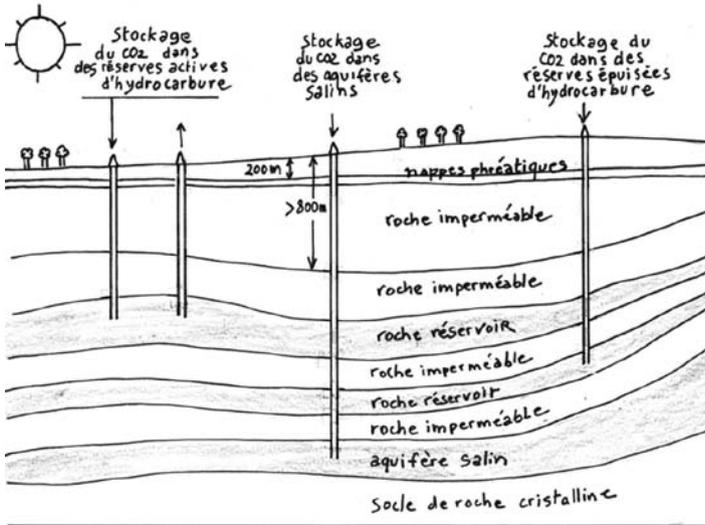


Figure 2.10 | La séquestration géologique du CO₂.

Des autorisations de séquestration du CO_2 ont déjà été octroyées.

C'est le cas par exemple du gouvernement norvégien qui a approuvé le financement du projet Northern Lights, porté par les compagnies Equinor (norvégienne), Shell (anglo-néerlandaise) et Total (française).

Près de deux tonnes de CO_2 seront stockées tous les ans sous la mer du Nord, à 2 600 mètres de profondeur, au large des côtes norvégiennes à partir de 2024.

Une cimenterie norvégienne a déjà signé un contrat de fourniture de 400 000 tonnes de CO_2 par an.

Le gaz est d'abord capté et liquéfié sur le site de production, puis acheminé en bateau vers un site de stockage temporaire situé sur la côte Ouest de la Norvège, puis transporté par pipeline vers un site de stockage situé à 100 km des côtes avant d'être injecté dans le réservoir définitif en profondeur.

Ainsi, dans le cas où la séquestration du CO_2 est appliquée à grande échelle, on peut envisager un procédé de production décarbonée d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.

La figure 2.11 schématise un tel procédé.

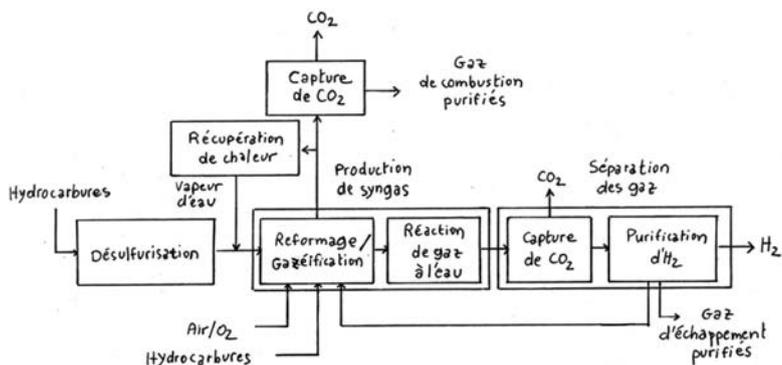


Figure 2.11 | Production décarbonée d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.

PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE UTILISANT LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Nous savons que le phénomène d'électrolyse fut découvert par Anthony Carlisle et William Nicholson en 1800.

Ils remarquent que lorsqu'ils plongent dans de l'eau deux fils métalliques reliés aux pôles d'une pile Volta, des bulles de gaz se forment à la surface de ceux-ci. Il s'agit d'oxygène au pôle (+) et d'hydrogène au pôle (-), au volume deux fois supérieur (voir fig. 1.2-b).

Ce phénomène sera expliqué trois ans plus tard par Humphry Davy, qui interprétera l'électrolyse comme une dissociation de la molécule d'eau en hydrogène et oxygène, induite par le passage du courant électrique.

L'électrolyse de l'eau est un procédé vorace en énergie.

Cette méthode n'est utilisée que pour obtenir de l'hydrogène très pur (puisque'elle ne produit que de l'hydrogène et de l'oxygène par construction) ou si l'on dispose d'électricité bon marché non utilisée pour d'autres usages.

La contribution de l'électrolyse à la production d'hydrogène est faible : environ 4 % de la production totale.

C'est toujours un procédé intéressant car l'hydrogène est un moyen de stocker un excédent ponctuel d'électricité, par exemple lorsqu'il y a du vent mais pas de demande de consommation électrique.

Pour la production de l'hydrogène par électrolyse avec l'énergie nucléaire, le réacteur nucléaire le mieux adapté est le réacteur à haute température refroidi au gaz hélium : le HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*) ou, en ce qui concerne la 4^e génération, le VHTR (*Very High Temperature Reactor*) ou encore le SMR (*Small Modular Reactor*).

À titre d'illustration, la figure 2.12 décrit un réacteur nucléaire de cogénération de type haute température (HTGR, refroidi à l'hélium), utilisable pour la production simultanée d'électricité et d'hydrogène.

Ce réacteur peut être de relativement faible puissance (300 MWe) et utilise l'hélium à haute température (entre 850 et 1 000 °C) comme fluide caloporteur.

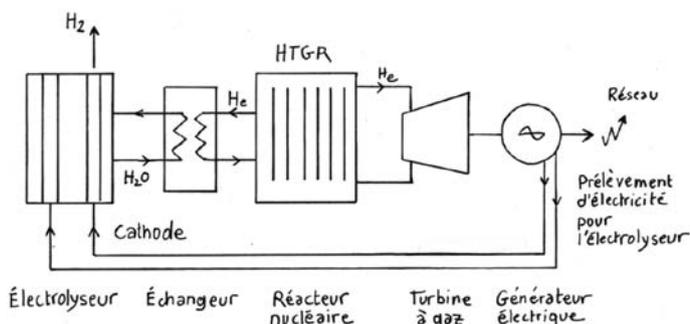


Figure 2.12 | Schéma d'un système de cogénération électricité/hydrogène à partir d'un réacteur nucléaire de type HTGR.

Les avantages d'une telle solution pour produire l'hydrogène sont nombreux : le recours à la cogénération induit une économie d'énergie par l'utilisation optimale de la chaleur dégagée par le réacteur nucléaire.

Le concept de réacteur nucléaire à haute température permet de s'accommoder de combustibles à base d'uranium, de plutonium et également de thorium dont les réserves mondiales sont abondantes (4 fois celles de l'uranium).

La production d'hydrogène s'effectue sans émission de gaz à effet de serre ou de gaz toxiques.

Au niveau de l'électrolyse :

- l'énergie totale à fournir est moins importante grâce à l'augmentation de la cinétique des réactions à haute température ;
- il est possible de fonctionner à forte densité de courant, d'où une capacité de production importante dans un faible volume.

Remarque : les nouveaux concepts de petits réacteurs d'une puissance inférieure à 300 MWe, appelés SMR (*Small Modular Reactor*), peuvent être attractifs dans une fonction de cogénération consistant

à produire d'une part de l'électricité et d'autre part une autre application comme la production d'hydrogène, le chauffage urbain ou le dessalement de l'eau de mer.

La production d'hydrogène vient d'être décrite. L'utilisation d'un réacteur à neutrons rapides refroidi à l'hélium permet d'atteindre un rendement de 48 %.

Concernant les deux autres applications, on utilise un SMR de type REP. Le rendement de sa turbine est classiquement de 33 % dédiés à la production électrique et les 67 % restants peuvent être affectés « gratuitement » au chauffage urbain ou au dessalement de l'eau de mer, plutôt que d'être perdus à la rivière ou la mer.

De la biomasse à l'hydrogène

La plupart des sources d'énergie, exceptées la géothermie et l'énergie nucléaire de fission, ont pour origine le rayonnement solaire (qui a pour origine l'énergie de fusion nucléaire dans le soleil).

Ainsi, ce sont de grandes quantités d'énergie solaire qui ont été accumulées dans les hydrocarbures, il y a des centaines de millions d'années.

On peut ainsi récupérer l'hydrogène qu'ils contiennent, mais il est parfois plus simple et plus économique de les utiliser directement pour leur qualité énergétique.

Plutôt que d'extraire l'hydrogène des hydrocarbures qui sont enfouis dans l'écorce terrestre, il vaut mieux extraire l'hydrogène de la biomasse qui s'est créée plus récemment.

En effet, la moitié des émissions de CO₂ dans l'atmosphère se recombine, soit par dissolution dans les océans, soit par création de matière végétale par réaction avec l'eau en présence de lumière et dégagement d'oxygène : c'est la photosynthèse (voir fig. 2.13).

Comme nous le savons, l'autre moitié du CO₂ émis reste dans l'atmosphère au moins un siècle avant de se recombinaer.

De cette manière, lorsqu'on brûlera la biomasse comme combustible, on rejettera dans l'atmosphère du CO₂ qui a été au préalable

prélevé de l'atmosphère pour créer de la matière végétale. D'aucuns considèrent que le bilan production-disparition de CO_2 est alors nul ou, en d'autres termes, qu'on respecte la neutralité carbone.

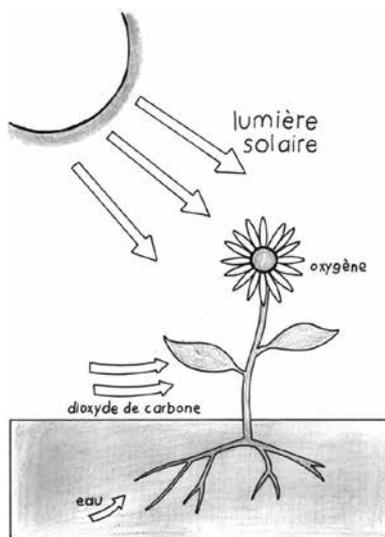


Figure 2.13 | Principe de la photosynthèse.

Ce processus de photosynthèse, grâce auquel les végétaux se développent, permet de synthétiser des molécules organiques complexes comme le saccharose ou l'amidon.

En outre, l'oxygène libéré par la photosynthèse permet d'entretenir le processus de respiration chez les êtres vivants.

Cependant, si le Soleil est indispensable pour la photosynthèse, l'eau l'est tout autant et elle n'est pas toujours présente en quantité suffisante dans les pays très ensoleillés souvent gagnés par la désertification.

On peut produire différemment l'hydrogène, à partir de la biomasse, des deux manières distinctes suivantes :

- soit par voie thermochimique ;
- soit par des procédés biologiques.

Production d'hydrogène par voie thermochimique

À l'instar des hydrocarbures, la première étape consiste à gazéifier la biomasse qu'il faut avant tout sécher puisqu'elle est initialement humide.

On lui fait subir ensuite une thermolyse, c'est-à-dire une dégradation thermique, aux alentours de 600 °C qui transforme 70 % de sa masse en gaz (CO , CO_2 , H_2 et CH_4) plus des goudrons.

Les 30 % restants donnent du charbon de bois. La température du gaz est augmentée et l'on introduit du gaz (de l'air, de l'oxygène ou de la vapeur d'eau) pour oxyder le carbone présent : c'est le processus de gazéification (voir fig. 2.14).

Cette opération se poursuit jusque vers 900 °C-1 000 °C et aboutit à la formation d'un mélange de gaz (CO , CO_2 , H_2 , CH_4).

Au final :

- soit on extrait l'hydrogène ;
- soit on utilise un gaz de synthèse pour fabriquer des carburants liquides.

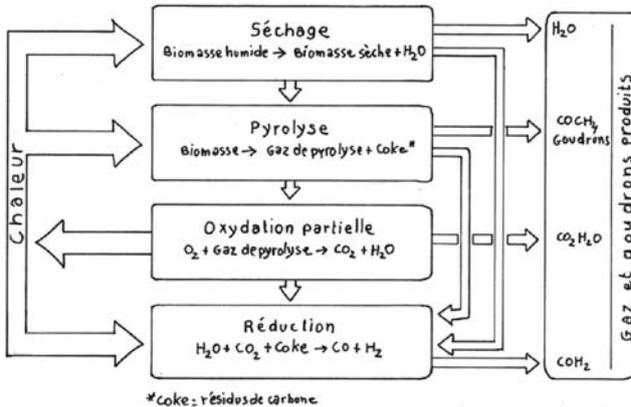


Figure 2.14 | Principe de gazéification de la biomasse.

Production d'hydrogène par des procédés biologiques

C'est une solution moins énergivore et plus respectueuse de l'environnement que les méthodes classiques de la chimie.

Le monde microbien peut produire des gaz, dont l'hydrogène, mais il s'agit encore d'un domaine peu investigué.

Des expériences ont montré qu'il était possible de produire de l'hydrogène dans des biotopes aérobies (en présence d'oxygène) ou anaérobies (en l'absence d'oxygène) avec des micro-organismes.

Le mécanisme repose sur des enzymes (substances organiques produites par des cellules vivantes), qui agissent comme catalyseur dans des réactions chimiques, notamment l'hydrogénase, qui catalyse la réaction de décomposition de l'eau avec dégagement d'hydrogène.

3

Comment stocker, transporter et distribuer l'hydrogène

LE STOCKAGE : UNE GAMME LARGE DE SOLUTIONS

On peut classer les réservoirs d'hydrogène en deux grandes catégories, à savoir les réservoirs embarqués que l'on peut déplacer et les réservoirs stationnaires qui restent fixes.

Dans les deux cas, l'efficacité du stockage constitue un enjeu capital.

Par exemple, pour alimenter une installation non raccordée au réseau électrique, on peut utiliser une pile à combustible (voir chapitre 4) connectée à un réservoir d'hydrogène stationnaire.

La souplesse qu'apporte ainsi l'hydrogène vis-à-vis du réseau électrique ne doit évidemment pas être alourdie par un stockage mal conçu.

Pour saisir la multiplicité et les difficultés des différentes formes de stockage disponible, il faut revenir aux propriétés physico-chimiques de l'hydrogène (voir chapitre 1).

Rappelons que l'hydrogène est un gaz léger et volumineux à température et pression usuelles (20 °C et 1 atm), qu'il se liquéfie

difficilement ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm) et que les atomes d'hydrogène ont une grande réactivité chimique, si bien qu'ils s'associent très facilement à d'autres éléments chimiques.

Ils s'infiltrent aussi dans toutes les fissures car la molécule d'hydrogène est très petite, ce qui peut par exemple générer une fragilité sur des alliages de métaux.

Compte tenu de ces caractéristiques, il existe trois grandes familles de stockage de l'hydrogène :

- le stockage gazeux ;
- le stockage liquide ;
- le stockage solide.

Le stockage gazeux

Le stockage de l'hydrogène gazeux sous forme comprimée peut être considéré aujourd'hui comme le stockage standard quand il s'agit de stocker quelques kilogrammes ou dizaines de kilogrammes. C'est le cas, notamment, des véhicules automobiles propulsés par une pile à combustible visant une autonomie de 400 à 500 km.

La masse d' H_2 à stocker est alors de l'ordre de 3 à 5 kg H_2 (voir fig. 3.1).

Les deux principales contraintes associées à ce type de conditionnement sont les fortes pressions requises et l'élimination des éventuelles fuites de H_2 .

Aujourd'hui, on est passé à des réservoirs pouvant supporter une pression de 700 bars avec la technologie des fibres bobinées (on renforce un liner plastique avec des fibres de matériaux composites, fibre de carbone principalement).

Sécurité

- Risque acoustique (jusqu'à 125 dB)

Il s'agit de petites fuites. Le bruit est équivalent à celui d'un marteau-piqueur.

- Asphyxie (fuite dans un espace confiné)

En occupant l'espace, l'hydrogène prive les personnes présentes d'oxygène.

- Risque d'inflammation (mélange avec O_2 en présence d'une étincelle).

Très probable en cas de fuite comme en témoigne l'accident du Zeppelin Hindenburg (voir § « Sécurité liée à l'utilisation de l'hydrogène », au chapitre 1).

- Déflagration (en cas de fuite importante, vitesse subsonique).
- Détonation (en cas de très forte dépressurisation, vitesse supersonique (1 980 m/s, onde de choc pouvant entraîner des dégâts importants).

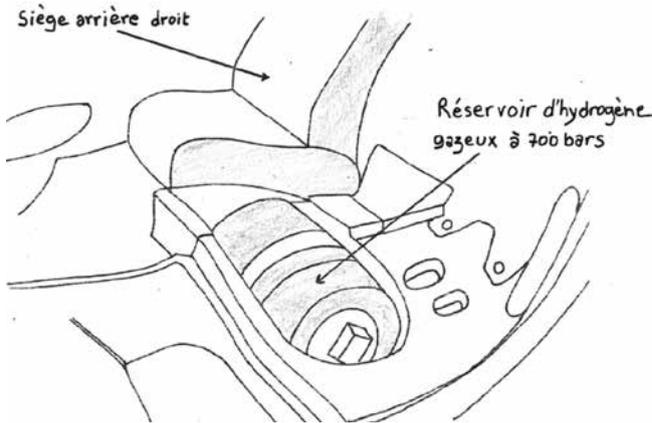


Figure 3.1 | Position d'un des réservoirs de H_2 gazeux sous le siège arrière, dans la Toyota Mirai. Chaque réservoir pèse 4,6 kg sous 700 bars.

Pour les petites mobilités, l'encombrement et le poids total occasionnés par les composants nécessaires à la propulsion hybride, à savoir les réservoirs H_2 , la batterie, la pile à combustible et le moteur électrique, sont importants et peuvent être problématiques (voir fig. 3.2).

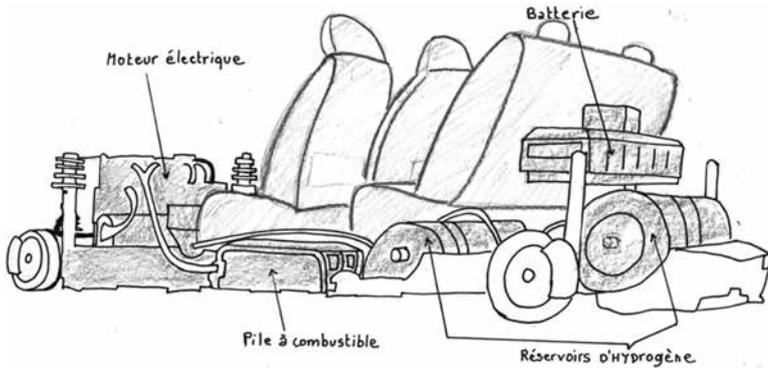


Figure 3.2 | Écorché de la Toyota Mirai hybride batterie/PAC.

Le stockage liquide

Lorsqu'on souhaite de plus grandes densités d'hydrogène, il faut alors passer à l'état liquide.

En effet, la densité de H_2 passe alors de 40 kg/m^3 à l'état gazeux sous 700 bars à 71 kg/m^3 à l'état liquide à 1 bar. Mais il faut pour cela refroidir H_2 à -253 °C et donc le conditionner dans un réservoir cryogénique volumineux.

Cela n'est rentable que pour des grandes quantités.

C'est pourquoi l'hydrogène liquide est utilisé comme carburant exclusivement dans le domaine aéronautique et spatial.

Dans la propulsion nucléaire thermique (NTP) (voir chapitre 7), le réservoir de stockage de l'hydrogène, qui est le gaz propulsif, occupe un volume très important comparé au cœur du réacteur nucléaire ou à la tuyère (voir fig. 3.4).

Le stockage solide

Il est très difficile de solidifier l'hydrogène, car il faut atteindre des températures de 6 °C inférieures à la température de liquéfaction.

Cependant, on peut le stocker sous forme solide à une température voisine des conditions normales, s'il est associé à un autre élément chimique.

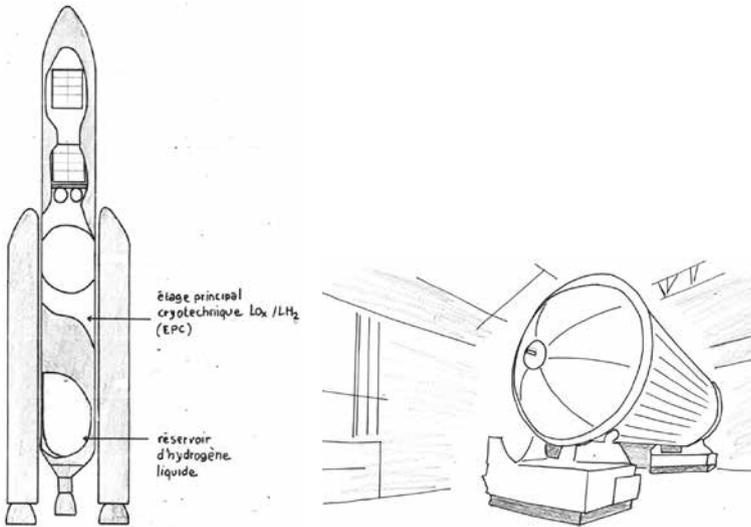


Figure 3.3 | Réservoir cryogénique d'hydrogène pour la fusée Ariane.

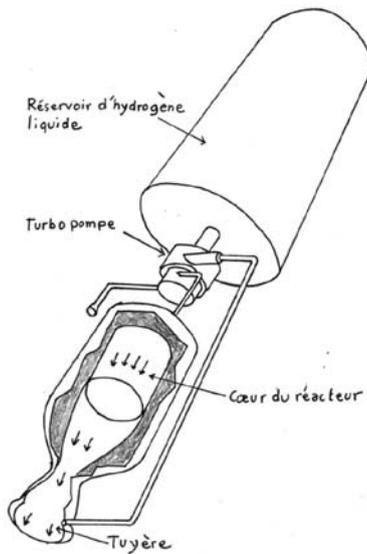


Figure 3.4 | Importance du volume occupé par le réservoir d'hydrogène dans la propulsion nucléaire thermique (NTP).

Cet élément peut être un hydrure (par exemple H_2 + vanadium, magnésium...).

C'est pour des applications embarquées que les hydrures semblent être les mieux adaptés.

TRANSPORT ET DISTRIBUTION

Pour les petites quantités, la livraison en cylindre de gaz est préférable. Pour de plus grands volumes, les trailers (camions) de gaz ou d'hydrogène liquide sont les moyens les moins onéreux.

Enfin, les plus gros volumes d'hydrogène gazeux sont directement livrés par canalisations (pipelines).

Transport par canalisation

L'Europe possède des réseaux de canalisations d'hydrogène d'un potentiel d'environ 40 000 km à l'horizon 2040.

Les principaux pays européens utilisant ce type de réseaux sont la France, l'Allemagne et le Benelux. Mais de plus petits réseaux existent notamment au Royaume-Uni, en Suède et en Italie.

Le plus grand réseau d'Europe est exploité par Air Liquide depuis 1966.

Son premier tronçon de 240 km, mis en service en Allemagne (Ruhr) en 1938 et réalisé en tubes d'acier ordinaire, est toujours en activité et n'a connu à ce jour aucune avarie.

Les pressions de service diffèrent selon les réseaux et sont généralement comprises entre 210 et 220 bars, pour des diamètres variant entre 250 et 300 mm.

L'essentiel des canalisations d'hydrogène est en surface.

Aussi les interventions de maintenance sont-elles aisées et le risque de poches d'hydrogène explosives, évité.

Selon certaines études, une adaptation des réseaux actuels de distribution de gaz naturel au transport de l'hydrogène serait possible sous certaines conditions.

Ainsi, le mélange du gaz naturel (CH_4) avec l'hydrogène (H_2) est envisagé dans des proportions de 6 % de H_2 en volume dans le court terme, mais elles pourraient atteindre 20 % à partir de 2030, sans modification majeure du réseau de gaz naturel initial. Cela suppose un prétraitement pour constituer le mélange et un post-traitement pour purifier l'hydrogène avant son utilisation ultérieure.

Transport routier

Actuellement, un quart de la distribution d'hydrogène se fait par camions avec des bouteilles d'hydrogène gazeux sous pression.

Mais au-delà de 300 km, cette solution n'est plus rentable et il faut passer à l'hydrogène liquide stocké dans un réservoir cryogénique avec double épaisseur et une super-isolation interne faite de mylar (film polyester) pour éviter le transfert thermique, et avec des pompes et des unités de vaporisation qui sont nécessaires pour maintenir la température à -253 °C (voir fig. 3.5).

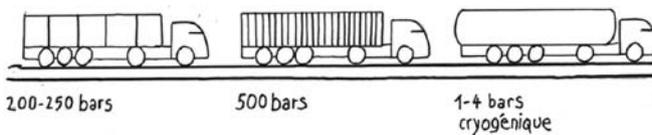


Figure 3.5 | Transport par camions de l'hydrogène gazeux et liquide.

L'hydrogène à la pompe

Pour faire le plein, on a le choix :

- soit de remplir le réservoir avec de l'hydrogène ;
- soit de changer directement le réservoir contre un neuf.

La première solution nécessite de construire dans chaque station des pompes à hydrogène qui, à partir d'un grand volume de stockage, rempliraient des réservoirs de plus petite taille.

Il faudrait que l'on puisse faire le plein en moins de 5 minutes pour que l'opération soit acceptable.

Donc, en envisageant des réservoirs de 60 litres, cela revient à avoir un débit minimum de 12 litres par minute.

Une station-service hydrogène typique peut comprendre un stockage basse pression si une production sur site par électrolyse est prévue (pression de sortie de l'électrolyseur supposée de 30 bars), un compresseur, un stockage haute pression (jusqu'à plus de 850 bars), un distributeur et, dans certains cas, un système de refroidissement jusqu'à -20 °C ou -40 °C .

Deux technologies de stations-services existent aujourd'hui : les stations à 350 bars pour les engins de manutention, les bus, les camions et la mobilité lourde en général, et celles à 700 bars pour les véhicules particuliers.

Le coût d'une station-service à 350 bars est largement inférieur à celui d'une station-service à 700 bars, essentiellement en raison du coût de la compression à très haute pression, rendant la viabilité économique des stations à 700 bars plus difficile à atteindre (voir fig. 3.6).

Notons que des stations à 350 bars peuvent recharger des véhicules à 700 bars (l'inverse n'est évidemment pas vrai) jusqu'à environ la moitié du volume de leur réservoir.

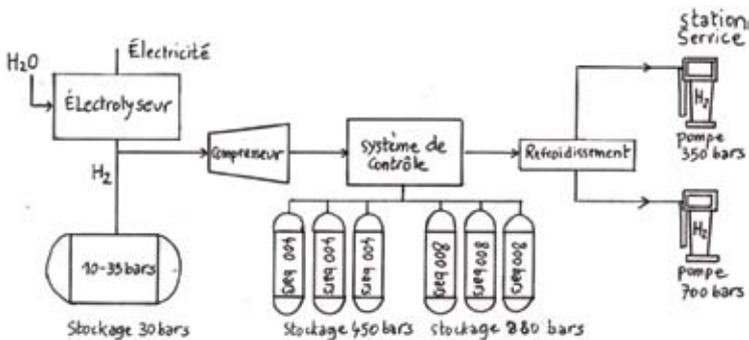


Figure 3.6 | Schéma de principe d'une station-service hydrogène équipée d'un électrolyseur.

La feuille de route de la Commission européenne concernant le déploiement des stations-services hydrogène considère généralement trois tailles de stations : 80 kg/j d'hydrogène, 200 kg/j et 400 kg/j.

Pour les stations autoroutières, des capacités de 1 000 kg/j d'hydrogène sont également envisagées (voir tab. 3.1).

Tableau 3.1 | Types de stations-services H₂ prévues par la Commission européenne.

	Très petite XS	Petite S	Moyenne M	Grosse L
Nombre de pistolets	1	1	2	4
Capacité max/j (kg)	80	212	420	1 000
Max de recharges/j	20	38	75	180
Max de véhicules/j	100	400	800	1 600

4

Les piles à combustibles ou piles « inusables »

Spécificité de l'énergie électrique

Parmi les différents vecteurs énergétiques, l'électricité est le plus important pour l'activité humaine, si bien que l'on peut mesurer le degré de développement économique d'un pays à la contribution de l'électricité à ses besoins énergétiques.

Cette contribution est aujourd'hui de 20 % en moyenne sur la planète, mais de 40 % dans les pays industrialisés. Son taux de pénétration est de 5 à 10 %/an dans certains pays en développement, alors qu'il n'est que de 1,5 %/an dans les pays de l'Union européenne. Cela signifie que le recours à l'énergie électrique témoigne de la volonté d'un pays de s'industrialiser.

L'électricité est également le principal besoin en énergie des économies émergentes.

Les raisons de ce succès sont multiples.

L'énergie électrique est le carrefour des énergies car elle peut être produite à partir de toutes les énergies primaires. Cela peut se faire

sans pollution atmosphérique à partir d'un combustible nucléaire ou d'une énergie primaire renouvelable.

En outre, l'électricité a la faculté de satisfaire, à tout moment et en tout lieu, de multiples besoins énergétiques grâce à un réseau de distribution fiable et dense.

Enfin, un appareillage électrique est généralement simple et rapide à manipuler.

En contrepartie, l'électricité possède l'inconvénient majeur de ne pas se stocker, si ce n'est en quantités faibles et à un coût élevé, sous forme d'énergie chimique dans les piles ou batteries d'accumulateurs. C'est notamment la faible autonomie de ces systèmes de stockage de l'électricité qui limite actuellement sa pénétration dans le domaine du transport.

La meilleure manière de la stocker pour un usage industriel consiste à procéder indirectement en faisant remonter l'eau d'une rivière ou d'un barrage équipé à cet effet d'un système de pompage, dans un réservoir situé en amont (la STEP). L'énergie potentielle accumulée sera libérée par gravité en période de forte demande d'électricité et l'énergie cinétique fournie par la vitesse de l'eau sera convertie en courant électrique dans une turbine à eau couplée à un alternateur.

Les principaux moyens de production de l'électricité sont :

- l'énergie fossile :
 - le charbon,
 - les hydrocarbures (pétrole, gaz) ;
- l'énergie nucléaire :
 - l'uranium,
 - le plutonium,
 - le thorium ;
- l'énergie renouvelable :
 - l'hydraulique (eau),
 - le solaire (rayonnement solaire),
 - l'éolien (vent),

- la biomasse (végétaux, déchets organiques),
- la géothermie (chaleur de la Terre).

Dans tous les cas précédents, on part d'une énergie primaire (fossile, fissile ou renouvelable) que l'on transforme, soit directement en énergie électrique (par exemple l'éolien : l'énergie mécanique du vent est transformée directement en énergie électrique), soit indirectement (par exemple le fossile : on transforme l'énergie chimique de l'hydrocarbure en vapeur, puis l'énergie thermique de la vapeur en électricité par l'intermédiaire d'un turboalternateur).

Par ailleurs, les chimistes ont remarqué, dès l'invention de la poudre à canon, que certains éléments chimiques réagissent fortement entre eux, parfois même de façon explosive.

Pour maîtriser cette énergie, Alessandro Volta réalise, il y a plus de deux siècles, un empilement de disques métalliques de deux types différents plongés dans un liquide et obtient une différence de potentiel aux bornes des deux disques.

Il démontre ainsi la possibilité de transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique.

La pile à combustible ou la pile inépuisable

Dans la recherche d'une pile « éternelle », les chercheurs ont vite compris qu'il fallait que les produits chimiques arrivent en continu aux électrodes, ce qui est aisé avec un gaz.

Par ailleurs, il fallait que les électrodes ne soient pas modifiées par les réactions.

L'hydrogène et l'oxygène ont très vite été reconnus comme étant d'excellents éléments permettant de transformer l'énergie de leur réaction chimique en énergie électrique.

La possibilité de réaliser ce processus, inverse de l'électrolyse de l'eau, avait été élaborée par Sir Humphry Davy en 1802.

Il s'agit bien d'une pile car on réalise un empilement d'éléments. Elle est dite à combustible car elle est alimentée par une espèce

chimique (le combustible) comme l'hydrogène, qui réagit avec l'oxygène de l'air (l'oxygène est appelé comburant).

Ainsi, la pile à combustible est un transformateur d'énergie durable idéal du point de vue environnemental, car elle ne produit que de l'électricité, de la chaleur et de l'eau.

Comment fonctionne une pile à combustible ?

Pour fabriquer de l'électricité avec une pile à combustible, il faut un agencement spécial pour éviter la réaction spontanée entre le comburant et le combustible.

C'est le rôle de 3 éléments : 2 électrodes et 1 électrolyte.

La pile à combustible fonctionne à l'inverse de l'électrolyse de l'eau.

À l'une des électrodes (dite anode), on utilise la capacité de l'hydrogène gazeux à se transformer en H^+ en libérant un électron.

L'ion H^+ est capté dans un milieu spécial, l'électrolyte, dont les propriétés principales sont de transporter les ions, de ne pas transporter les électrons et d'être étanche aux gaz (phénomène de *gas crossover*), à l'hydrogène et à l'oxygène en particulier.

Lorsque l'ion H^+ a traversé cet électrolyte, il arrive à la seconde électrode (dite cathode) qui reçoit l'électron qui a parcouru le circuit extérieur en générant un courant électrique.

En présence d'oxygène, il se forme de l'eau et de l'électricité (voir fig. 4.1).

Ainsi, l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour former de l'eau avec circulation d'électrons dans un circuit externe générant un courant électrique.

Parallèlement, il y a circulation du même nombre de charges électriques à l'intérieur de la pile grâce à la présence du milieu particulier qu'est l'électrolyte. Les lois de l'électrochimie déterminent le potentiel auquel chaque électrode réalise la transformation électrochimique.

Entre l'hydrogène et l'oxygène, la « différence de potentiel » n'est malheureusement pas très élevée : environ 1,3 volt et lorsque le courant traverse la pile, des pertes électriques (effet Joule) inévitables abaissent la tension utilisable à 0,6 V.

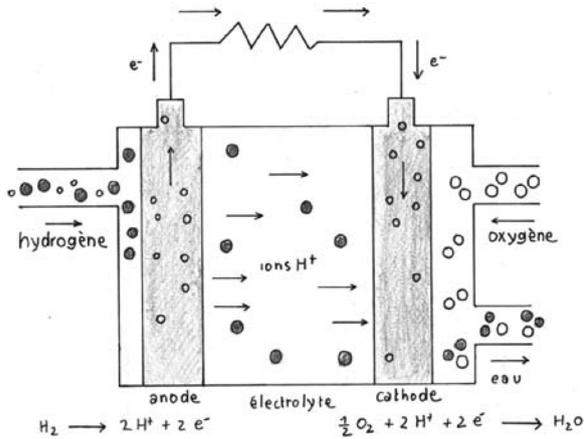


Figure 4.1 | Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Ce faible voltage conduit, comme pour la première pile de Volta, à empiler en série des dizaines voire centaines d'éléments anode-électrolyte-cathode appelés « monocellules » pour augmenter la différence de potentiel délivrée par l'ensemble (voir fig. 4.2).

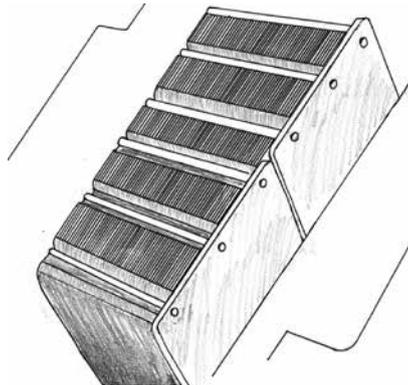


Figure 4.2 | La pile à combustible est un empilement de monocellules.

La pile à combustible possède des propriétés remarquables. Son fonctionnement a un meilleur rendement (de l'ordre de 40 %) que celui d'un moteur à combustion interne alimenté en hydrogène.

De plus, il ne nécessite pas de pièce mobile à l'intérieur de la pile, il est silencieux et sans vibration.

Le choix du combustible est restreint à l'hydrogène, aux alcools et au gaz naturel.

Par ailleurs, le choix de l'électrolyte est déterminant dans sa capacité à conduire des ions.

Les chimistes se sont vite focalisés sur des acides (porteurs d'ions H^+) ou des bases (porteuses d'ions OH^-) dont les ions sont très mobiles au sein de l'électrolyte, sachant qu'en outre cela dépend notamment de la température.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides.

Aujourd'hui, les principaux **électrolytes** disponibles sur le marché sont :

- les solutions aqueuses concentrées en potasse (pile alcaline AFC (*Alcaline Fuel Cell*)) fonctionnant entre -30 °C et $+80\text{ °C}$, l'ion mobile étant OH^- ;
- les polymères solides très spécifiques contenant l'ion H^+ , fonctionnant entre 0 °C et 90 °C : PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane*) ou SPE (*Solid Polymer Membrane*) sont souvent utilisés ;
- de l'acide phosphorique chaud (à plus de 200 °C) (PAFC, *Phosphoric Acid Fuel Cell*), l'ion mobile étant H^+ ;
- des sels fondus (MCFC, Molten Carbonate à plus de 650 °C), l'ion mobile étant le CO_3^{2-} ;
- des céramiques spéciales à très haute température (plus de $1\ 000\text{ °C}$) (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*), l'ion mobile étant OH^- .

Les électrodes doivent remplir plusieurs fonctionnalités dont la plus délicate est d'assurer le passage des gaz hydrogène ou oxygène à l'état d'ion H^+ ou OH^- .

Ce passage n'est pas aussi spontané qu'espéré.

On accroît la vitesse de réaction, donc la quantité d'électricité produite, grâce à un catalyseur finement dispersé dans l'électrode.

Malheureusement, celui-ci, constitué de matériaux coûteux comme le platine, est d'autant plus nécessaire que la température de fonctionnement est basse.

Une multiplicité de piles à combustible

Il existe plusieurs technologies de piles à combustible aux caractéristiques et aux applications variées.

Même si on est encore loin d'une diffusion massive de ce type de technologie, des progrès notables ont été faits et de gros efforts de R&D sont en cours au plan mondial pour améliorer les performances.

LA PILE ALCALINE (AFC)

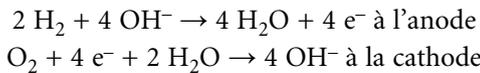
C'est la plus ancienne des piles et la moins coûteuse.

L'AFC (*Alkaline Fuel Cell*) a été utilisée dans les véhicules spatiaux par la NASA pour les missions Apollo depuis le milieu des années 1960 et le reste encore pour les vols habités.

Elle utilise un électrolyte alcalin, la potasse (KOH), éventuellement la soude (NaOH). C'est une technologie simple et bon marché mais qui doit disposer d'air pur exempt de CO₂, qui est un poison pour la pile en réagissant avec la potasse pour donner du carbonate de potassium (K₂CO₃).

En revanche, une large gamme de catalyseurs peut être utilisée sur les électrodes (Pt, Ni, certains alliages...).

Les réactions mises en jeu sont :



À la pression atmosphérique, elles fonctionnent vers 80-90 °C mais peuvent aussi produire de l'électricité à plus haute température (jusqu'à 260 °C) et sous haute pression (3-4 bars), comme c'est le cas dans le domaine spatial.

Leur durée de vie peut atteindre 15 000 heures.

Dans le spatial, les piles à combustible ont fonctionné plus de 80 000 heures au total.

Les puissances mises en jeu vont du kilowatt à la dizaine de kilowatts.

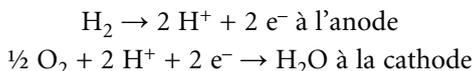
Un prototype de 5 kW a ainsi équipé en 1998 un taxi londonien pour charger les batteries d'une propulsion hybride (pile à combustible + batterie).

LA PILE À MEMBRANE ÉCHANGEUSE DE PROTONS (PEMFC)

La pile PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), ou pile à membrane électrolyte polymère, fonctionne à basse température et présente un grand intérêt, notamment pour les transports car elle peut démarrer rapidement, ce qui explique qu'elle concentre une grande partie des investissements dans le domaine des piles à combustible.

Dans une PEMFC, les électrodes sont séparées par un électrolyte solide conducteur de protons.

Les réactions élémentaires aux électrodes sont :



La PEMFC fonctionne vers 80-100 °C.

Elle est malheureusement très sensible à l'oxyde de carbone (CO), qui est un poison du platine (le CO bloque de façon irréversible les sites actifs) qui est le catalyseur nécessaire au bon fonctionnement de la pile.

On voit sur les figures 4.3 et 4.4 qu'une cellule PEMFC est composée de 4 couches distinctes numérotées de 1 à 4 :

- 1 : Plaque bipolaire (graphite ou métal) :
 - conduit l'électricité (électrons) ;
 - évacue la chaleur ;
 - évacue l'eau et l'air résiduel.
- 2 : Couche de diffusion :
 - diffuse le gaz sur la couche catalytique.
- 3 : Couche catalytique (platine) :
 - catalyse la réaction chimique ;

– permet aux seuls protons de passer dans la membrane (électrolyte).

• 4 : Membrane polymère (électrolyte composite à base de Nafion (tétrafluoroéthylène sulfonaté)) :

– ne conduit pas l'électricité mais seulement les protons H^+ de l'anode vers la cathode ;

– garantit l'étanchéité afin d'éviter le mélange hydrogène/oxygène potentiellement explosif.

Plusieurs applications sont possibles :

• transports (automobiles, bus, trains, navires, sous-marins), avec des puissances allant de 50 à plus de 200 kWe ;

• cogénération pour le résidentiel tertiaire avec des puissances autour de 100-300 kWe ;

• la maison individuelle, avec des puissances inférieures à 10 kWe.

Il reste néanmoins de nombreux problèmes à résoudre pour assurer la fiabilité à long terme et diminuer le coût des PEMFC afin de les rendre économiquement compétitives.

Étant donné sa faible température de fonctionnement (à partir de 60 °C), la pile PEMFC est bien adaptée aux mobilités légères.

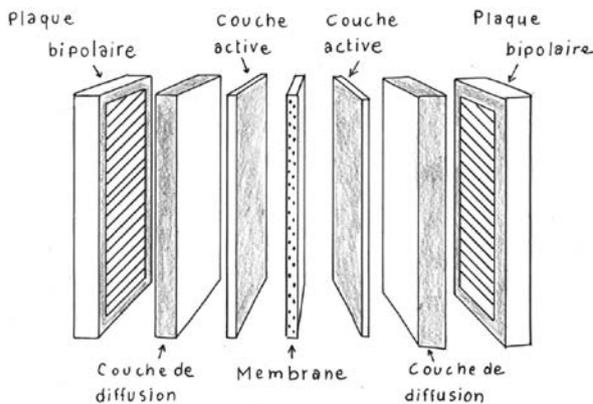


Figure 4.3 | Schéma de principe d'une monocellule de pile PEMFC.

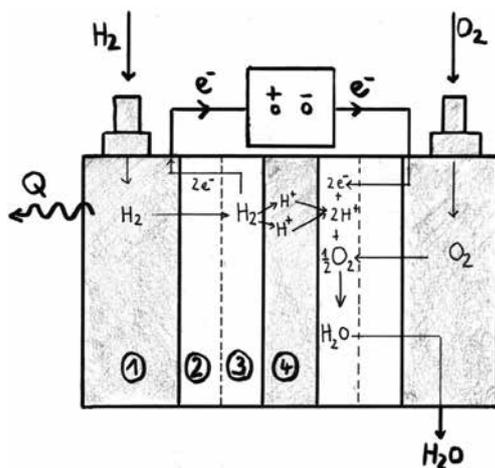


Figure 4.4 | Structure d'une cellule PEMFC.

LA PILE À ACIDE PHOSPHORIQUE (PAFC)

Cette pile (voir fig. 4.5) permet d'obtenir de grandes puissances, mais a l'inconvénient d'avoir pour électrolyte l'acide phosphorique, qui est un liquide corrosif.

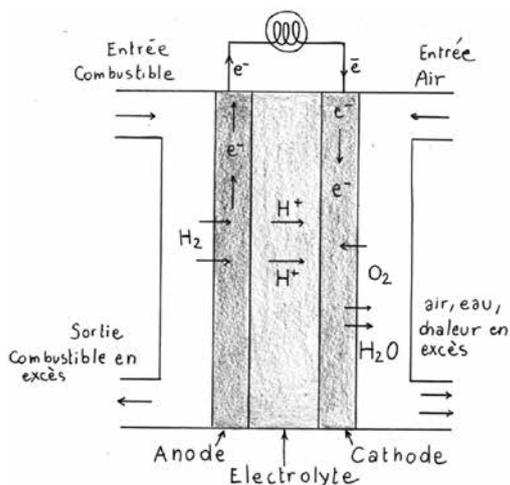


Figure 4.5 | Pile PAFC à électrolyte d'acide phosphorique (H_3PO_4).

Ces piles sont les premières à avoir été commercialisées et elles sont aujourd'hui répandues dans le monde avec des puissances allant de la centaine de kWe au MWe.

Le combustible peut être du méthane, du propane ou du biogaz.

La PAFC fonctionne à une température de 200 °C.

Les réactions aux électrodes sont du même type que celles de la PEMFC.

Elle doit être utilisée dans une gamme de températures étroite allant de 190 à 210 °C, afin d'éviter toute dégradation.

Enfin, l'acide phosphorique est peu coûteux mais le platine, qui est nécessaire comme catalyseur, est très cher.

LA PILE AU CARBONATE FONDU (MCFC)

La pile MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) (voir fig. 4.6) utilise un mélange de carbonates fondus dans une matrice céramique poreuse comme électrolyte. Les puissances peuvent être très importantes.

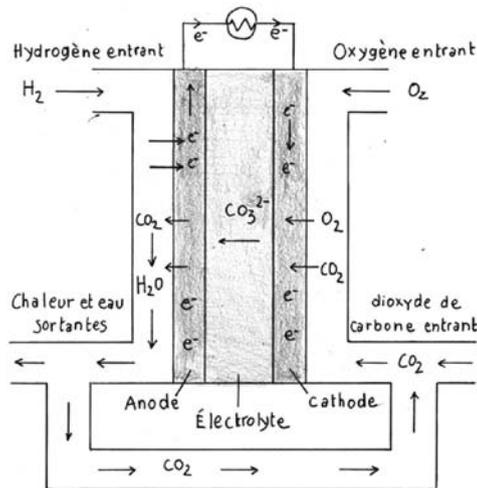


Figure 4.6 | Pile MCFC au sel fondu (carbonate CO_3^{2-}).

Elle peut être utilisée en cogénération avec des rendements de l'ordre de 45 % en électricité et 35 % en chaleur.

La gestion des carbonates fondus pose certains problèmes notamment en raison de leur température (650 °C) et de leur corrosivité, aussi cette technologie n'est-elle pas très développée actuellement.

Ces piles peuvent néanmoins être développées pour des applications industrielles (centrales thermiques) et militaires.

LA PILE À OXYDE SOLIDE (SOFC)

La SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) utilise une céramique constituée d'un oxyde solide comme électrolyte (habituellement de la zirconie (dioxyde de zirconium) dopée à l'yttrium (terre rare)). Elle fonctionne à haute température (800-1 000 °C), ce qui lui permet d'être moins sensible aux polluants ou impuretés présents dans le combustible.

Ce dernier peut être de l'hydrogène, du méthane ou tout autre composant contenant des atomes d'hydrogène (voir fig. 4.7).

Bien que des études sur ce type de technologie aient commencé dans les années 1930, il a fallu attendre les années 1983-1989 pour que de véritables développements démarrent.

Cette technologie est adaptée aux équipements de cogénération stationnaires.

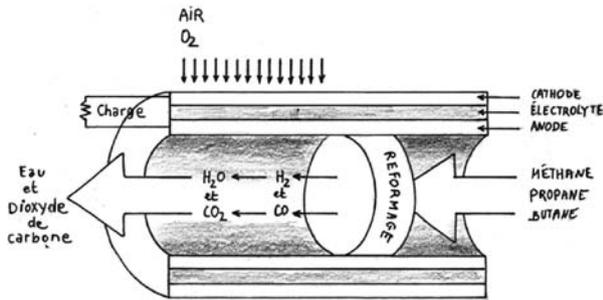
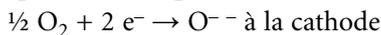


Figure 4.7 | Principe de conception de la pile à oxyde solide SOFC.

Des puissances de 100 MWe peuvent être atteintes.

Les réactions aux électrodes sont les suivantes :



Le fonctionnement à haute température de la pile permet d'exploiter, dans une installation stationnaire, une partie de la chaleur dégagée à l'aide d'une turbine à gaz.

La température élevée de l'anode permet aussi de reformer directement le combustible et il n'y a pas nécessité d'avoir un catalyseur coûteux.

Pour cette raison, on peut imaginer des SOFC stationnaires fonctionnant d'abord avec du gaz naturel, progressivement mélangé à de l'hydrogène, avant d'utiliser un jour cet hydrogène pur.

De l'hydrogène produit in situ

Nissan a annoncé en 2016 qu'elle développait un véhicule à pile à combustible utilisant le bioéthanol comme carburant dont la commercialisation était initialement prévue pour 2020, puis retardée.

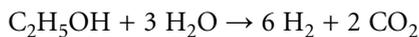
Ainsi, elle utilise un carburant facilement disponible et « propre » puisqu'il est issu de la biomasse, contrairement à l'hydrogène qui doit être disponible dans un réseau national de stations-services dédiées.

Le bioéthanol produit de l'hydrogène en réagissant avec de la vapeur d'eau dans un reformeur embarqué. Puis, la réaction de cet hydrogène avec l'oxygène de l'air dans une pile à combustible SOFC produit un courant électrique qui va alimenter un moteur électrique conçu pour actionner les roues du véhicule (voir fig. 4.8).

La SOFC fonctionne à haute température et, comme il a été dit plus haut, elle se dispense d'un catalyseur, en platine ou en métaux rares, toujours très onéreux.

Cependant, le démarrage n'est pas immédiat puisqu'il faut d'abord monter la pile à combustible en température.

Dans le reformeur embarqué, on a donc :



Puis, l'hydrogène produit réagit avec l'oxygène de l'air dans une SOFC pour donner classiquement :



Étant donné la convention énoncée au Chapitre 1 stipulant que l'émission de CO_2 à partir de la biomasse respecte la neutralité carbone, la voiture de Nissan au bioéthanol serait considérée comme propre, puisque le CO_2 émis au niveau du reformeur provient du bioéthanol, mais est-ce vraiment neutre vis-à-vis du réchauffement climatique ?

Par ailleurs, faire fonctionner un système à plus de 700 °C dans une mobilité légère ne pose-t-il pas un problème de sécurité, surtout en présence d'hydrogène ?

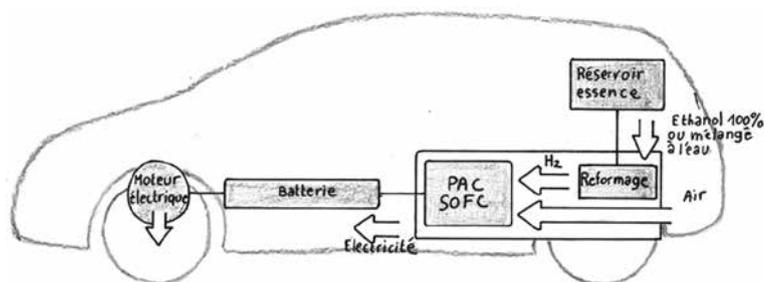


Figure 4.8 | Développement par Nissan d'une pile SOFC pour véhicule.

LA PILE AU MÉTHANOL (DMFC)

La pile DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*) utilise un électrolyte solide et fonctionne autour de 120 °C avec le méthanol (alcool méthylique CH_3OH) pour combustible.

Elle présente un intérêt pour l'alimentation des équipements portables (micro-ordinateurs, téléphones portables...).

Le méthanol est facile à produire mais il a l'inconvénient d'être toxique pour l'Homme (son ingestion peut mener à des atteintes neurologiques, à la cécité et même à la mort) et de se mélanger facilement à l'eau.

En conclusion, nous pouvons classer les PAC en fonction du type d'électrolyte, de la gamme de températures et de puissances (voir tab. 4.1).

Nous pouvons également les classer en fonction du type de combustible et du type d'application (voir fig. 4.9).

Cette même figure rend compte également de la diversité des combustibles utilisables et de l'étendue des domaines d'application de ce procédé original de production d'électricité qu'est la pile à combustible.

Tableau 4.1 | Les différentes PAC et leurs plages de fonctionnement.

Type	Électrolyte	Température	Applications possibles	Gamme de puissance
Alcaline	Liquide (Potasse)	50-250 °C	Spatial Portable	1-100 kW
Acide phosphorique	Liquide (Acide phosphorique)	160-220 °C	Stationnaire	200 kW-10 MW
Carbonate fondu	Liquide (Sel fondu)	650-1 050 °C	Stationnaire	200 kW-10 MW
Méthanol direct	Solide (Polymère)	60-90 °C	Portable Transports Stationnaire	1 W-250 kW
Acide polymère (PEMFC)	Solide (Polymères)	60-120 °C	Stationnaire Transports	1 W-250 kW
Oxyde solide (SOFC)	Solide (Céramique)	700-1 000 °C	Stationnaire Transports	1 kW-10 MW

Enfin, insistons sur la capacité de la pile à combustible associée à un électrolyseur, à stocker et restituer l'électricité, à l'instar des STEPs (Stations de transfert d'énergie par pompage) dans le domaine hydraulique.

L'électrolyseur joue alors le rôle du pompage hydraulique de la STEP et la pile à combustible joue le rôle du turbinage (voir fig. 4.10).

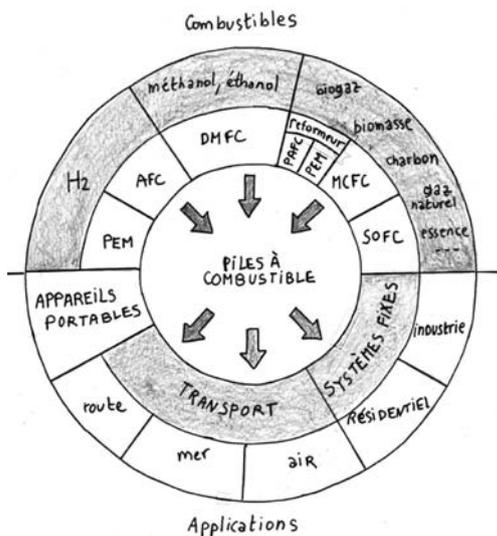


Figure 4.9 | Les PAC : leurs combustibles et leurs domaines d'application.

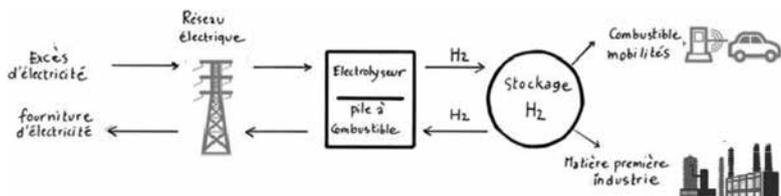


Figure 4.10 | Utilisation simultanée d'une pile à combustible et d'un électrolyseur pour des applications stationnaires et mobiles.

5

L'hydrogène : une matière première à notre disposition

En France, la demande en hydrogène décarboné pourrait passer de 0,9 million de tonnes actuellement (2020) à 5,5 millions de tonnes en 2050 en alimentant 18 % du parc de véhicules pour le transport de passagers et de fret.

Il pourrait également être utilisé pour la production de chauffage et d'électricité dans l'industrie (10 %) et pour les ménages (12 %) dans des scénarios le mélangeant avec du gaz naturel.

Enfin, associé à du CO₂, il peut assurer la production de matières premières utilisées pour la production de plus de 2 millions de tonnes de produits chimiques et 1,5 million de tonnes d'acier.

À court terme, l'industrie consommatrice d'hydrogène apparaît comme le secteur le plus à même de bénéficier d'un hydrogène décarboné.

La mobilité est ensuite le secteur le plus prometteur pour accélérer la transition énergétique puisque 70 % de l'énergie consommée par ce secteur est issue de produits pétroliers et qu'elle est le principal

émetteur de gaz à effet de serre en France avec 29 % des émissions totales en 2020.

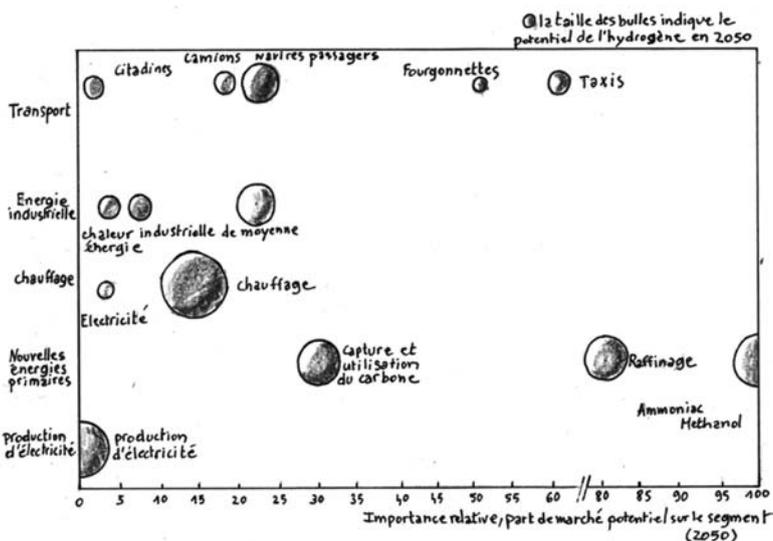


Figure 5.1 | Potentiel de l'hydrogène en France à l'horizon 2050.

Remarque : la figure 5.1 donne en première ligne les potentialités des transports.

Les mobilités terrestres, aériennes et spatiales sont traitées aux chapitres 6 et 7.

Par ailleurs, dans ce qui suit, on mettra l'accent sur la 4^e ligne et notamment sur la synthèse de l'ammoniac et la désulfuration des hydrocarbures, qui constituent les domaines d'utilisation de l'hydrogène les plus importants aujourd'hui.

À plus long terme, autour de 2050, l'alimentation en électricité et en chauffage des bâtiments apparaît comme un domaine à fort potentiel dans la feuille de route du gouvernement français concernant l'hydrogène (voir fig. 5.1). Ce dernier secteur requérant un réseau de distribution d'hydrogène qui pourrait être le réseau de gaz naturel après un travail d'adaptation tant technique que réglementaire.

Actuellement, 74 millions de tonnes d'hydrogène sont produites annuellement pour l'industrie mondiale en 2018.

En comparaison, près de 10 millions de tonnes d'hydrogène sont produites en Europe et 1 million de tonnes en France (voir fig. 5.2).

L'hydrogène est principalement utilisé pour la synthèse de l'ammoniac nécessaire à la production des engrais azotés, la désulfuration des hydrocarbures au niveau de leur raffinage et l'industrie chimique.

On le retrouve également dans la métallurgie, la microélectronique et la production de verre.

La production d'ammoniac représente 38 % des débouchés de l'hydrogène au niveau mondial, contre 44 % pour le raffinage du pétrole.

Dans l'industrie de l'ammoniac ou du méthanol, des synergies sont recherchées et exploitées pour minimiser les coûts de l'énergie, les coûts d'investissement et améliorer la compétitivité du produit final.

Production d'H₂ en million de tonnes – 2018

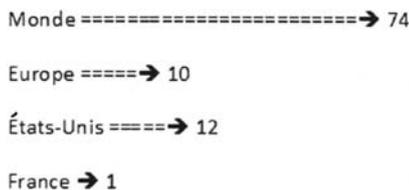


Figure 5.2 | Répartition de la production d'hydrogène mondiale en 2018.

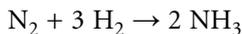
DANS LA CHIMIE ET LA PÉTROCHIMIE

Synthèse de l'ammoniac

La production d'ammoniac exige, après la fabrication du gaz de synthèse (mélange CO + H₂) issu du reformage du gaz naturel, un reformage secondaire à l'air.

Celui-ci consomme l'oxygène de l'air en oxydant le monoxyde de carbone (CO) en dioxyde de carbone (CO₂) tout en fournissant les

quantités appropriées d'azote (N_2) permettant la synthèse de l'ammoniac selon la réaction :



Près de la moitié de la production d'ammoniac mondiale est réalisée par des unités couplées à de la production d'urée $CO(NH_2)_2$, permettant la récupération et la valorisation du CO_2 émis.

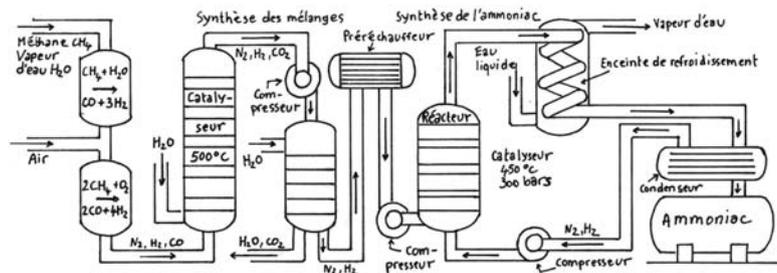
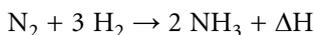


Figure 5.3 | Production industrielle de l'ammoniac (l'hydrogène provient du méthane et l'azote de l'air) par le procédé Haber-Bosch.

Description du procédé Haber-Bosch

Le procédé Haber-Bosch consiste à favoriser la réaction exothermique de l'équation chimique à l'équilibre :



En génie chimique, cette réaction est réalisée en plusieurs étapes :

- Reformages (en amont du réacteur) :

- Purifier le dihydrogène
- Éliminer les poisons catalytiques

- Synthèse (dans le réacteur) :

- Introduire du dihydrogène pur (H_2)
- Introduire du diazote (N_2)
- Synthétiser de l'ammoniac (NH_3) à l'aide de catalyseur

- Extraction (en aval du réacteur) :

- Séparer l'ammoniac des autres molécules (N_2 et H_2) par liquéfaction

- Recycler les molécules restantes
- Recycler la chaleur produite

Pour parvenir à effectuer ces étapes de façon économique, il faut que le système de production :

- fonctionne à des pressions de l'ordre de 200 atm ;
- fonctionne à des températures variant de 500 à 600 °C ;
- fasse circuler en permanence des gaz et des liquides sous haute pression ;
- recycle la chaleur produite.

Production des engrais azotés

Les engrais azotés simples sont fabriqués à partir de l'ammoniac, obtenu par la combinaison de l'azote de l'air et de l'hydrogène provenant du gaz naturel. Environ 80 % du coût de production de l'ammoniac est lié à l'utilisation de gaz naturel (voir fig. 5.4).

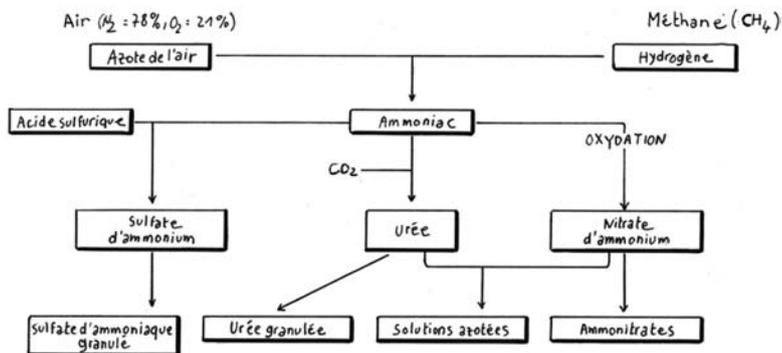


Figure 5.4 | Production d'engrais azotés.

Le cycle de l'azote (voir fig. 5.5)

Dans le cycle de l'azote de la figure 5.5, nous observons que la synthèse de l'ammoniac intervient à l'étape 3 du cycle.

La synthèse de l'ammoniac utilise le gaz naturel et l'eau pour produire du dihydrogène (H_2) et le combiner au diazote (N_2) présent dans l'atmosphère pour former l'ammoniac (NH_3), matière première

des grands engrais azotés. L'engrais azoté peut contenir de l'azote sous forme uréique, ammoniacale, nitrique ou un mélange de ces formes.

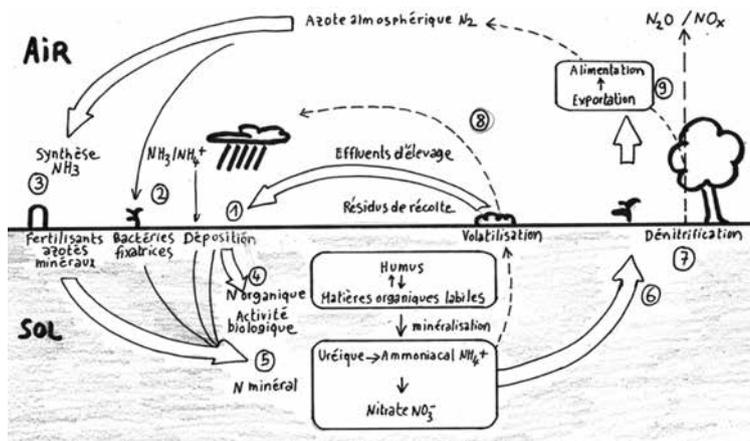


Figure 5.5 | Le cycle de l'azote en agriculture.

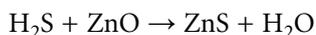
Désulfuration des hydrocarbures

Il est nécessaire de désulfurer les hydrocarbures dans les raffineries pour leur utilisation ultérieure.

Par exemple, le vaporeformage du méthane utilise des catalyseurs qui sont annihilés par le soufre s'il est mélangé au gaz.

Le procédé d'élimination du soufre des hydrocarbures s'effectue en deux étapes :

- On produit du sulfure d'hydrogène H_2S par réaction de l'hydrocarbure avec l'hydrogène. La réaction s'effectue à 350-400 °C en présence d'un catalyseur (Co-Mo ou Ni-Mo).
- L'élimination totale du soufre s'effectue par combinaison de H_2S avec de l'oxyde de zinc à 400 °C :



DANS LE RÉSEAU DE TRANSPORT DE L'ÉLECTRICITÉ

L'énergie primaire, une fois convertie en énergie secondaire, doit être acheminée jusqu'à l'utilisateur final. Cette mission s'effectue en deux étapes : il s'agit d'abord de transporter massivement l'énergie des centres de production vers les régions consommatrices, puis de distribuer localement l'énergie vers les utilisateurs.

Dans la mesure du possible, on transporte et distribue l'énergie à l'aide de réseaux.

Par analogie avec le réseau routier, le réseau de transport correspond au réseau d'autoroutes et le réseau de distribution, au réseau de routes secondaires.

L'exemple le plus représentatif est le réseau électrique français (voir fig. 5.6).

Pour limiter les pertes en lignes par effet Joule, le transport d'électricité s'effectue à très haute tension, alors que la distribution est assurée à basse tension. On peut ainsi découper le réseau électrique français en fonction du niveau de tension électrique :

- **Le réseau de transport** (400 kV et 225 kV) recouvre toutes les régions de France grâce à un maillage suffisamment fin et traverse en une dizaine de points nos frontières afin de s'interconnecter avec les réseaux des pays voisins. Il achemine de grandes quantités d'électricité des centrales de production vers les régions consommatrices.

- **Les réseaux de répartition** (90 kV et 63 kV) sont un sous-ensemble du réseau de transport et desservent des zones de consommation dans un découpage plus fin.

- **Les réseaux de distribution** (20 kV à 400 V) assurent la liaison entre les réseaux de répartition et les clients finals.

Les réseaux sont reliés deux à deux par des stations de transformation (transformateurs) permettant de passer d'une tension donnée à la tension inférieure suivante.

Concernant l'utilisation de l'hydrogène sur le réseau électrique, on peut distinguer les situations où les services sont rendus en tant

que solution de stockage (chaîne complète) de celles où la flexibilité offerte au système provient uniquement du pilotage des électrolyseurs.

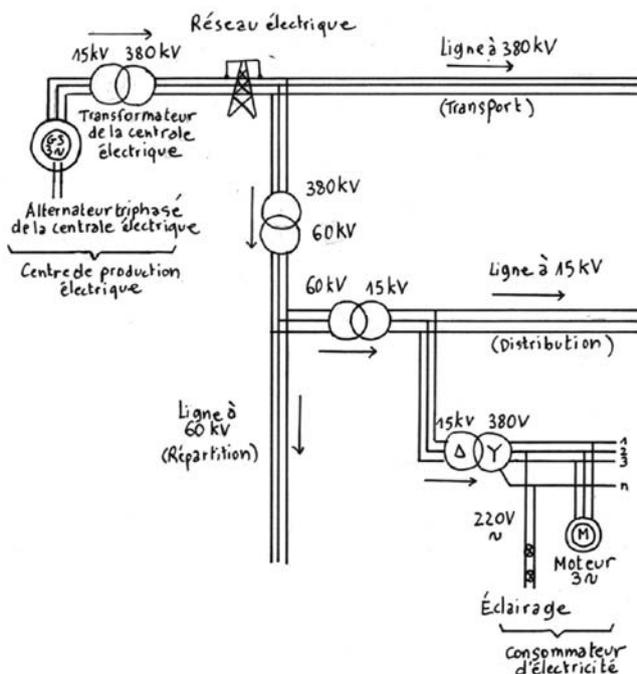


Figure 5.6 | Transport et distribution de l'électricité en France.

En effet, dans le premier cas, l'ensemble du déploiement de la solution est effectué pour les seuls besoins du système électrique, et se retrouve en concurrence avec d'autres solutions techniques plus compétitives.

Dans le second cas, l'électrolyseur peut être déployé seul pour des besoins de production d'hydrogène, et seul son coût de pilotage entre en compétition avec les autres leviers de flexibilités disponibles dans le système électrique.

Cette seconde option offre d'ailleurs des possibilités à plus court terme et permet d'envisager des premiers déploiements d'ici à 2035.

Les systèmes électriques isolés

Le terme « isolé » est utilisé pour un système électrique qui n'est pas relié à un réseau électrique plus grand.

Un système isolé peut être sécurisé afin qu'en cas de défaillance du réseau, la charge continue de recevoir de l'électricité sans interruption.

Il peut être également intéressant sur le plan économique.

L'efficacité économique signifie que la charge reçoit l'électricité au prix le plus bas possible pour ce système électrique.

Le plan français de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique identifie que l'hydrogène peut offrir une capacité de stockage d'énergie aux zones non interconnectées et demande à EDF et à l'Ademe de caractériser, pour chaque zone non interconnectée, les services que pourrait rendre l'hydrogène afin de permettre aux collectivités concernées de prévoir, dans leurs programmations pluriannuelles de l'énergie, des mesures et des objectifs spécifiques concernant le stockage de l'électricité à partir de l'hydrogène.

À titre d'illustration, prenons l'exemple de l'île de la Réunion, dans l'océan Indien.

Dès 2017, EDF et l'Ademe ont intégré l'hydrogène dans les solutions envisagées pour le stockage de l'électricité dans le cirque de Mafate situé sur l'île. Ce site compte 800 habitants. Il est visité chaque année par 80 000 touristes car classé au patrimoine mondial de l'Unesco. Il n'est cependant accessible qu'à pied ou en hélicoptère, rendant son électrification complexe.

Des panneaux photovoltaïques ont été installés dans les années 1980 avec un générateur diesel assurant l'alimentation électrique de secours en l'absence de soleil.

Pour supprimer le recours au diesel émetteur de CO₂, on a installé un système permettant de stocker l'excédent de production d'électricité des panneaux photovoltaïques dans des batteries lithium-ion et dans de l'hydrogène produit par un électrolyseur.

L'hydrogène stocké est consommé à la demande par une pile à combustible produisant de l'électricité pour recharger les batteries en l'absence d'ensoleillement avec une capacité de production de plusieurs jours.

Report de charge

Le report de charge consiste à réduire la charge sur le système de production en fournissant de l'électricité à la pointe.

Pour ce faire, le système de stockage doit se charger au moment le plus opportun (c'est-à-dire quand le coût marginal de production d'électricité est le plus faible), au creux de la demande résiduelle.

Le système hydraulique de transfert d'énergie par pompage (STEP) remplit cette fonction : lorsque le coût de l'électricité est bas, l'eau du réservoir en aval est pompée vers un réservoir en amont ; lorsqu'il est haut, l'eau est turbinée pour produire de l'électricité et renflouer le réservoir inférieur (voir fig. 5.7).

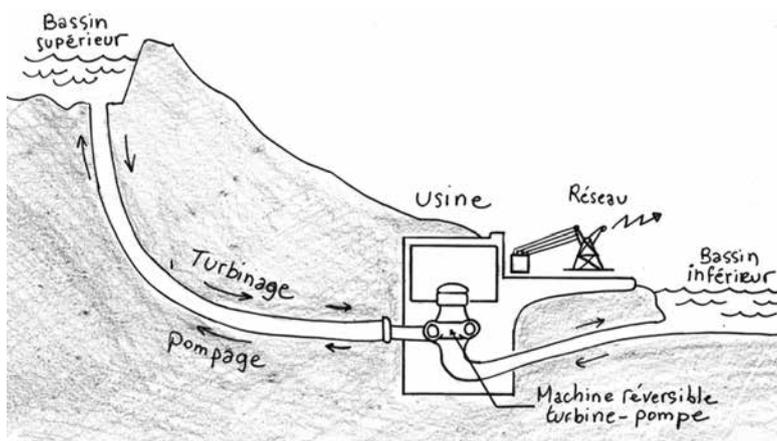


Figure 5.7 | Stockage et restitution d'électricité au réseau avec la Station de transfert d'énergie par pompage (STEP).

La figure 4.10 montre qu'un système composé d'un électrolyseur et d'une pile à combustible (voir aussi Chapitre 4) peut remplir la même

fonction qu'une STEP, l'électrolyseur jouant le rôle du pompage de la STEP et la pile à combustible jouant le rôle du turbinage.

Réglage de fréquence associé à une production flexible

La stabilité de la fréquence du réseau électrique à 50 Hz traduit l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

Si la fréquence chute brutalement (en dessous de 48,5 Hz), les centrales thermiques et nucléaires déclenchent les unes après les autres, jusqu'à l'effondrement complet du réseau, c'est-à-dire l'occurrence d'un black-out.

C'est ce qui faillit arriver en Europe en 2006 à partir d'un événement banal et routinier.

Le 5 novembre 2006, dans le Nord de l'Allemagne, l'opérateur d'électricité E.ON mit hors-service une ligne électrique de très haute tension qui enjambait la rivière Ems afin de permettre au navire de croisière le *Norwegian Pearl* de quitter le chantier naval Meyer à Papenburg et de rejoindre la mer du Nord sans risquer de déclencher un court-circuit.

Cette opération était habituelle, mais certaines erreurs d'appréciation furent commises, qui déclenchèrent, à la suite de la mise hors tension de la ligne, des déséquilibres dans de nombreuses lignes du réseau interconnecté européen où la production devint soudainement inférieure à la demande, ce qui provoqua une chute de fréquence sur ces lignes en dessous de 49 Hz et le déclenchement en cascade de centrales de production électrique dans toute l'Europe.

Ces coupures subites sur un vaste territoire, dont une partie sur le territoire français, évitèrent un black-out qui aurait plongé 200 millions d'Européens dans le noir pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours.

Le réglage en fréquence est donc indispensable pour assurer un équilibre permanent entre l'offre et la demande et faire face aux aléas tels que la perte d'un groupe de production.

Afin d'assurer cet équilibre, différents types de réserves sont activées, selon des dynamiques variables en fonction des différentes situations en présence.

Dans le cas de l'événement relaté ci-dessus, on fit appel à des centrales hydroélectriques dont le démarrage peut être activé rapidement.

Le couplage d'un électrolyseur et d'une pile à combustible peut également constituer l'une de ces réserves, comme il a été dit plus haut.

Aide à l'autoproduction

L'autoconsommation d'électricité pour des besoins domestiques consiste à consommer l'énergie produite localement, par exemple par des panneaux photovoltaïques (PV), plutôt que de revendre cette électricité sur le réseau.

Des PV produisent l'électricité nécessaire aux besoins résidentiels et le surplus est transformé par un électrolyseur en de l'hydrogène qui sera stocké sous forme gazeuse dans un réservoir sous pression.

Lorsque les PV fonctionnent peu ou pas du tout, par exemple pendant la nuit, l'hydrogène est converti, grâce à une pile à combustible, en électricité afin de continuer de satisfaire les besoins du consommateur.

Évidemment, si l'on veut atteindre un taux d'autoconsommation d'électricité de 100 %, théoriquement possible, il faut à la fois une forte capacité de production des PV et de faibles besoins en consommation domestique.

Étant donné le coût d'installation d'une telle infrastructure et les faibles rendements de l'électrolyseur et de la pile à combustible, un tel procédé est loin d'être compétitif aujourd'hui.

6

L'hydrogène, un vecteur énergétique pour les transports terrestres et aériens

L'HYDROGÈNE POUR DÉCARBONER LES TRANSPORTS TERRESTRES

La mobilité électrique zéro émission à pile à combustible

Un véhicule à pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène (FCEV, *Fuel Cell Electric Vehicle*) fournit de l'électricité à partir de l'hydrogène pour alimenter un moteur électrique.

Le combustible (l'hydrogène gazeux) nécessaire à la réaction avec l'oxygène de l'air est stocké dans des réservoirs sous très forte pression (350 ou 700 bars) afin de disposer d'un maximum d'énergie dans un minimum de place.

L'autonomie d'un véhicule à hydrogène est donc définie par la quantité d'hydrogène stockée et la pression de stockage.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, il existe différents types de piles à combustible qui se différencient par leur température de fonctionnement, la nature de leurs composants (électrolyte et électrode) et la variété des combustibles hydrogénés qu'elles tolèrent.

Dans la mobilité, la pile à combustible à membrane polymère conductrice de protons (PEMFC) est la mieux adaptée.

S'agissant d'un gaz, le remplissage du réservoir avec de l'hydrogène est très rapide, de l'ordre d'environ 3 minutes pour une quantité garantissant une autonomie de 600 à 700 km.

Le véhicule électrique à hydrogène vient en complément de la batterie sur les marchés de la mobilité électrique longue distance et de la mobilité lourde qui ont plus de difficultés à se passer des hydrocarbures avec une tendance à s'orienter vers le gaz naturel (CNG, *Compressed Natural Gas*) et le gaz liquéfié (LNG, *Liquefied Natural Gas*) via une motorisation thermique qui reste fortement émettrice de CO₂.

Dans le monde, les immatriculations cumulées depuis 2005 s'élèvent à presque 13 000, dont les deux tiers au cours des deux dernières années (de 2017 à 2019).

On peut estimer le parc de véhicules en circulation à plus de 10 000 véhicules.

La figure 6.1 montre que les États-Unis et le Japon dominent au plan des immatriculations cumulées depuis 2005.

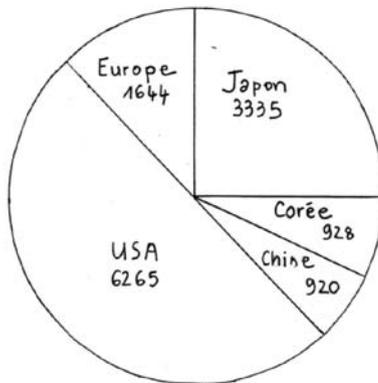


Figure 6.1 | Répartition mondiale des ventes cumulées de véhicules hydrogène passagers depuis 2005.

Le positionnement de l'Asie est en accord avec l'hégémonie de ses constructeurs automobiles.

Toyota reste le leader incontesté avec près de 8 000 Mirai mises sur le marché entre 2015 et 2018 et une volonté d'accélérer les ventes avec un objectif de 500 000 véhicules vendus en 2025.

Hyundai conforte sa position de second constructeur de la filière hydrogène avec l'arrivée en 2018 de 800 Nexo qui s'ajoutent au millier de ix35 déjà en circulation.

Honda a déployé plus de 1 500 Clarity Fuel Cell au Japon et aux États-Unis entre 2016 et 2018.

Les Chinois SAIC et Dongfeng manifestent un intérêt croissant, surtout sur le segment des véhicules utilitaires légers, et ont déployé plus de 500 véhicules sur la seule année 2018.

Face aux constructeurs asiatiques, les constructeurs européens Daimler (Allemagne) et Symbio One (France) poursuivent leurs ventes à un rythme plus hésitant, avec environ 230 Kangoo H2 pour Symbio One et moins de 100 Daimler GLC, tandis que les constructeurs Nord-Américains sont absents.

Le niveau de maturité des véhicules diffère selon leur segment d'usage, la mobilité non routière ne s'étant intéressée à l'hydrogène que tardivement.

L'autonomie élevée et le temps de recharge très court sont deux atouts de l'hydrogène qui sont exploités dans des secteurs d'activité à fort kilométrage ou nécessitant une forte disponibilité des véhicules.

C'est le cas des industries de la logistique (engins de manutention, véhicules utilitaires ou petits camions de livraison).

C'est également le cas des flottes de taxis ou de bus.

Enfin, le segment de la mobilité lourde, routière et non routière qui requiert d'embarquer de grosses quantités d'énergie pour disposer de l'autonomie requise pour les camions, les trains, les bateaux ou les avions, est un terrain favorable à l'hydrogène.

Le tableau 6.1 donne le niveau de maturité technologique des différentes formes de mobilités hydrogène.

Tableau 6.1 | Niveau de maturité technologique des différentes formes de mobilité hydrogène. Sur une échelle de 0 à 10.

9	Voyage dans l'espace	Engin de manutention	
8	Bus	Voiture	
7	Trains	Cyclomoteur	Camion
6	Aviation	Transport maritime	

La mobilité légère

Les engins de manutention

Les chariots élévateurs constituent le segment de marché le plus avancé technologiquement pour la mobilité hydrogène.

Dans les secteurs de la logistique utilisant des engins de manutention à batterie au plomb et fonctionnant en continu, l'immobilisation d'un véhicule pendant plusieurs heures cause des pertes financières et affecte les cadences. Il est ainsi souvent nécessaire d'investir dans deux ou trois engins pour un même poste afin de satisfaire les cadences. La batterie au plomb peut facilement être remplacée par une pile à combustible sans modifier la structure du chariot, pour permettre un fonctionnement sur la journée.

Le leader sur le marché est aujourd'hui l'entreprise américaine Plug Power mais d'autres acteurs tels que Toyota, Linde ou Air Liquide avec sa filiale Axane, se positionnent pour développer le marché européen après le succès rencontré aux États-Unis.

Les véhicules légers d'entreprise

Beaucoup d'entreprises publiques s'équipent de véhicules électriques à batterie ou à pile à combustible.

Les premiers modèles de véhicules à batterie parmi lesquels le KangooZE n'ont pas toujours rempli les exigences avec une autonomie

trop faible (180 km) et un temps de recharge trop long (plusieurs heures).

La compagnie Symbio Fuel Cell a rapidement identifié ce problème et a développé un véhicule hybride batterie/pile à combustible pour augmenter l'autonomie et abaisser le temps de recharge.

Un kit hydrogène contenant la pile à combustible et le réservoir d'hydrogène a été ajouté à la batterie tandis que la recharge se fait sans connexion directe avec le moteur électrique.

Ce prolongateur d'autonomie à hydrogène a permis d'étendre l'autonomie du véhicule (+ 80 km supplémentaires pour le HyKangoo) répondant ainsi à la plupart des besoins.

L'ajout de ce kit a augmenté le prix du véhicule mais il demeure accessible grâce à un dimensionnement de la pile à combustible à son strict minimum et un réservoir d'hydrogène de 1,7 kg d'hydrogène à 350 bars.

Ainsi, le prix de Symbio Fuel Cell était en 2016 de 17 000 € à comparer au prix de 30 000 € au total pour le HyKangoo produit à une centaine d'unités par an (vs. 13 000 € pour le KangooZE).

Les véhicules individuels

En ce qui concerne la mobilité individuelle, la puissance de la pile à combustible est beaucoup plus importante que celle de la batterie hybridée. On parle alors de véhicule « full » hydrogène (FCEV).

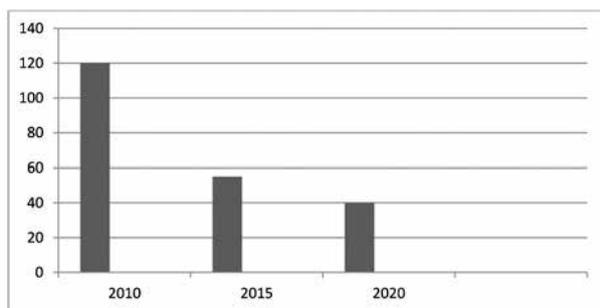
L'hydrogène est stocké dans un réservoir à 700 bars de 100 à 150 litres pour stocker 4 à 6 kg d'hydrogène permettant une autonomie de 500 à 600 km.

En comparaison, un réservoir d'essence a une capacité de 50 à 60 litres pour un véhicule de moyenne gamme, tandis qu'un modèle haut de gamme peut contenir de 70 à 80 litres de carburant proposant plus de 1 000 km d'autonomie.

Un véhicule hydrogène permet d'embarquer plus d'énergie qu'une batterie à poids équivalent, mais moins d'énergie qu'un réservoir d'essence.

Aujourd'hui, trois constructeurs automobiles commercialisent des berlines hydrogène : Toyota (Mirai), Hyundai (ix35 FCEV), Honda (Clarity).

Le prix de ces véhicules est compris entre 40 000 et 70 000 €, soit une orientation drastique à la baisse, puisqu'en 2010, le prix des véhicules à pile à combustible était de l'ordre de 120 000 € (voir fig. 6.2).



2010 : Daimler B-Class

2015 : Toyota Mirai Gen1, Hyundai Ix35, Honda Clarity Fuel Cell

2020 : Toyota Mirai Gen2

Figure 6.2 | Comparaison des prix de ventes en k€HT des berlines à hydrogène de 2010 à 2020.

Ces prix, encore trop élevés pour un marché de masse, s'adressent aux clients des segments haut de gamme ou spécifiquement aux taxis qui récupèrent la TVA.

Des progrès technologiques sont encore possibles pour réduire le coût de la pile à combustible et du réservoir d'hydrogène.

L'optimisation de l'hybridation batterie/pile à combustible dans la version prolongateur d'autonomie peut également permettre des baisses de coût en bénéficiant de la baisse des prix des batteries.

Les figures 6.3A et 6.3B montrent l'évolution de la conception entre 2014 et 2021 de la Toyota Mirai avec la batterie, les réservoirs d'hydrogène à 700 bars gazeux, la pile à combustible PEMFC et le moteur électrique.

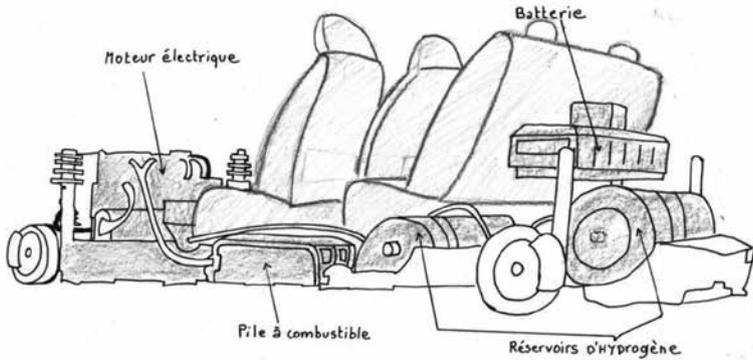


Figure 6.3A | Écorché de la Toyota Mirai 1^{re} génération (traction) (2014).

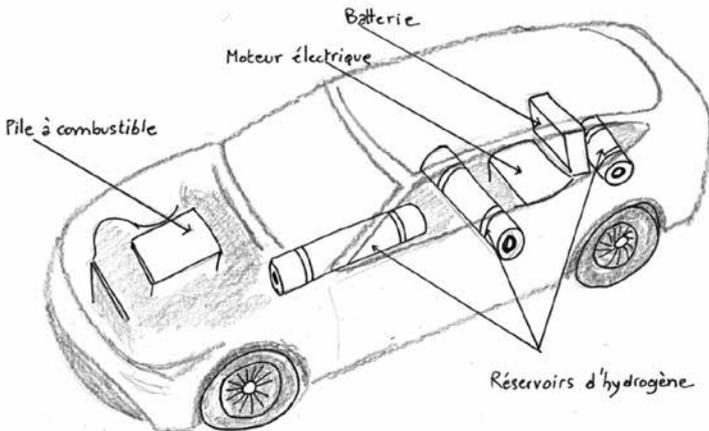


Figure 6.3B | La Toyota Mirai 2^e génération (propulsion) (2021).

Les caractéristiques des composants de la nouvelle conception de la Toyota Mirai figurent sur le tableau 6.2.

D'une manière générale, force est de constater que l'hydrogène mettra du temps à détrôner la batterie pour les berlines, car du point de vue du confort, si l'on tient compte de l'encombrement engendré par les réservoirs d'hydrogène, la pile à combustible, la batterie et le moteur électrique, il ne reste plus beaucoup de place pour l'habitacle.

Tableau 6.2 | Caractéristiques des composants de la Toyota Mirai de 2^e génération.

Pile à combustible	
Type	PEMFC à 330 cellules
Puissance	128 kW/174 Ch
Volume	25 litres
Poids	52 kg
Densité de puissance	5 kW/L
Réservoirs d'hydrogène	
Masse totale H₂ stockée	5,5 kg
Volume total des 3 réservoirs	140 litres
Batterie Lithium-ion	La batterie accumule l'énergie cinétique récupérée lors des phases de freinage et de décélération pour alimenter le moteur électrique.
Nombre des cellules	84
Tension	310 V
Capacité énergétique	4 Ah
Moteur électrique	
Puissance max	134 kW/182 Ch
Couple moteur max	300 Nm
Type	Moteur triphasé synchrone

Ses caractéristiques générales peuvent être résumées dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 | Caractéristiques générales de la Toyota Mirai modèle 2021.

Hybride Batterie/PAC
Consommation d'hydrogène : 0,85 kg/100 km
0 émission CO ₂
Autonomie : 650 km
Durée du ravitaillement : 5 min
Vitesse max : 175 km/h
Accélération de 0 à 100 km/h : 9 secondes
Prix (2022) : 67 900 €

En outre, les performances techniques restent assez médiocres pour un prix très élevé (voir tab. 6.3).

Enfin, la croissance du parc sera longtemps entravée par la difficulté de développer un réseau de distribution d'hydrogène qui réponde à la demande (voir § « Transport et distribution », au chapitre 3).

La mobilité lourde

L'apparition de camions, bateaux et trains équipés de piles à combustible est récente. La mobilité lourde, hormis les bus (voir § « Les bus », ci-après), est le dernier segment de la mobilité à s'être intéressé à l'hydrogène.

Le terme « mobilité lourde » englobe une vaste gamme d'applications, depuis le véhicule utilitaire destiné à la livraison du dernier kilomètre (e-commerce), jusqu'au transport longue distance dans des camions de 40 tonnes et aux usages non routiers (transport ferroviaire, fluvial, maritime et aérien).

Pour ces différents segments de marché, des solutions existent ou sont en cours de développement.

Le choix de l'option PAC, batterie ou hybride batterie/PAC, dépend du segment de marché :

- Utilitaires : 80 % des véhicules utilitaires font plus de 100 km/jour.

On choisira la solution hybride batterie/PAC.

Nous savons qu'il existe la possibilité d'utiliser un véhicule électrique standard avec un kit d'expansion pour une PAC.

- Véhicules lourds : la batterie seule ne fonctionne pas (il faut transporter plus de batteries que de fret !). On utilisera une PAC de forte puissance.

- Gros camions (40 tonnes) : le meilleur choix consiste à rester au diesel pour l'instant.

Les bus

Actuellement, des bus à hydrogène sont utilisés dans plusieurs villes d'Europe et affichent une autonomie comprise entre 250 et 400 km pour 10 à 35 kg d'hydrogène embarqué.

Plusieurs fabricants de bus (Solaris, Van Hool, VDL) s'intéressent à l'hydrogène en Europe et aux États-Unis.

Le Citaro Fuel Cell Bus (Evobus) de Daimler est un exemple de bus à hydrogène européen.

Daimler est l'un des premiers constructeurs à s'être positionné sur le créneau des bus à hydrogène, en collaboration avec le fabricant de piles à combustible Ballard Power Systems.

Le Citaro Fuel Cell Bus mesure 12 m de long, est équipé d'une pile à combustible de 120 kW et d'un réservoir de 35 kg d'hydrogène gazeux à 350 bars, qui assure une autonomie de 350 à 400 km, soit une consommation de l'ordre de 10 kg par 100 km, pour un temps de recharge d'environ 20 minutes.

L'HYDROGÈNE POUR DÉCARBONER L'AVIATION COMMERCIALE

L'aviation commerciale représente moins de 3 % des émissions des GES au plan mondial, ce qui est peu en valeur relative.

Cependant, cela correspond en valeur absolue à environ 1 milliard de tonnes de CO₂ émis par année, soit l'équivalent des émissions annuelles du Japon, ce qui n'est pas négligeable.

Quels sont les leviers permettant de réduire l'impact de l'aviation sur le climat ?

Par application de l'équation de Kaya à l'aéronautique, on peut écrire :

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}} \times \frac{\text{TEP}}{\text{Trafic}} \times \text{Trafic}$$

On identifie ainsi 3 termes :

- l'intensité carbone $\frac{\text{CO}_2}{\text{TEP}}$ est la quantité de CO₂ libérée pour chaque unité d'énergie (carburant) utilisé ;

- l'intensité énergétique $\frac{\text{TEP}}{\text{Trafic}}$ est la quantité d'énergie utilisée pour qu'un passager fasse 1 kilomètre ;
- le trafic aérien.

Chaque terme de la décomposition de Kaya correspond à un levier envisageable pour réduire les émissions de CO₂ :

- la diminution de l'intensité carbone est le levier de décarbonation du carburant ;
- la diminution de l'intensité énergétique est le levier d'efficacité énergétique ;
- la diminution du trafic aérien est le levier de sobriété.

Plusieurs scénarios d'évolution de l'activité aéronautique ont été analysés selon l'effort que l'on consent à fournir pour améliorer la technologie et la décarbonation du combustible, et les résultats ont montré que pour satisfaire un objectif de 2 °C en 2100, seul le recours à une technologie de rupture (de type aile volante, voir fig. 6.7) et une décarbonation totale de la flotte (notamment par l'utilisation intensive de l'hydrogène) pourraient éviter une baisse du trafic aérien dans les prochaines années.

En prenant un objectif plus réaliste de 3 °C en 2100, on dispose d'une marge de manœuvre un peu plus confortable et le maintien, voire la croissance, du trafic aérien peut encore être envisagé.

Application d'une approche systémique sur l'évolution du trafic aérien

Nous ne pouvons pas nous satisfaire d'une analyse isolée du domaine aéronautique et seule une approche globale, dite systémique, a un sens car il existe à l'évidence des interactions multiples entre tous les domaines de l'activité humaine.

D'aucuns considèrent même que l'Homme, du fait de son action planétaire et durable, serait devenu une force géologique responsable d'une nouvelle ère appelée « Anthropocène », qui viendrait

clure l'« Holocène », dernière période inter-glacière démarrée il y a 12 000 ans.

Nous avons vu au Chapitre 2 que pour des raisons d'épuisement des réserves d'hydrocarbures et de réchauffement climatique, nous allons très probablement subir dans les prochaines années une baisse de la richesse mondiale.

En conséquence, les échanges commerciaux et touristiques diminueront en entraînant une baisse du trafic aérien.

Ainsi, une approche systémique permet de contredire ce que laissait prédire une analyse trop spécifique sur le taux de croissance du trafic aérien.

L'hydrogène, carburant alternatif privilégié pour l'aéronautique

Les transports aériens cherchent donc des carburants alternatifs leur permettant de réduire leur dépendance au pétrole.

L'hydrogène apparaît alors sous différentes formes et pour différents usages.

D'une part, l'hydrogène liquide peut être envisagé dans l'aviation pour alimenter des piles à combustible assurant la production d'électricité à bord en complément de l'électricité produite par la turbine du réacteur.

D'autre part, il y a deux manières d'utiliser l'hydrogène liquide pour la propulsion d'un avion :

- utilisation d'une pile à combustible ;
- remplacement du kérosène par l'hydrogène dans la chambre de combustion du réacteur.

La technologie PAC sera utilisée sur les petits avions de l'aviation générale et, éventuellement, en hybridation avec la turbopropulsion hydrogène pour les vols régionaux.

Pour les avions de ligne de moyen-courrier, on aura recours aux turboréacteurs hydrogène.

L'avionneur Airbus et le motoriste franco-américain CFM International (50 % Safran, 50 % GE) se sont associés (annonce du

22/02/2022) pour tester un système de propulsion à l'hydrogène sur un A380.

Objectif : un transport aérien à zéro émission de polluants et de gaz à effet de serre à l'horizon 2035.

CFM International se concentrera sur les modifications de la chambre de combustion du réacteur, le circuit du carburant et le système de commande du turboréacteur General Electric Passport (voir fig. 6.4) afin qu'il fonctionne à l'hydrogène dans des conditions optimales.

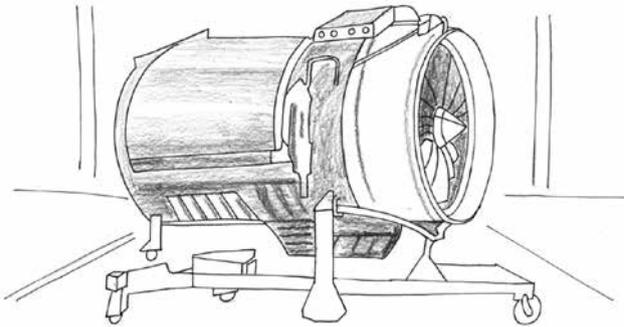


Figure 6.4 | Le réacteur Passport de GE choisi pour être converti à l'hydrogène.

De plus, comme l'hydrogène liquide est 4 fois plus volumineux que le kérosène pour la même énergie fournie et doit être stocké sous forme cylindrique pour des raisons de tenue mécanique, une solution consiste à intégrer les réservoirs de LH₂ dans le fuselage arrière de l'avion (ou dans les ailes de l'aile volante).

Les premiers tests au sol devraient débuter en 2023 et les premiers tests en vol, en 2026 (voir fig. 6.5 et 6.6).

L'A380 modifié pour les tests en vol sera doté d'une nacelle contenant le turboréacteur fonctionnant avec de l'hydrogène à la place du kérosène.

Cette nacelle sera située en hauteur sur la partie arrière gauche du fuselage (voir fig. 6.5).

Quatre réservoirs d'hydrogène liquide totalisant 400 kg seront installés à l'arrière de l'appareil pour alimenter ce moteur, tandis que quatre turbofans classiques au kérosène resteront en place sous les ailes (voir fig. 6.6).

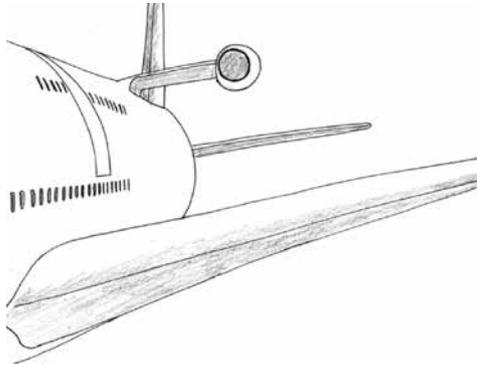


Figure 6.5 | Partie arrière de l'A380 montrant le turboréacteur à hydrogène de démonstration sur la nacelle.



Figure 6.6 | Test en vol du A380 avec, sur le fuselage arrière, la nacelle contenant le turboréacteur à hydrogène.

L'objectif de 2035 est de faire voler 3 types d'avions d'Airbus avec de l'hydrogène à la place du kérosène :

- un turbopropulseur court-courrier ;
- un turbofan moyen-courrier ;
- une aile volante moyen-courrier (voir fig. 6.7).

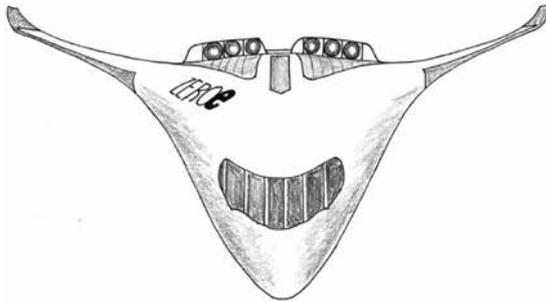


Figure 6.7 | Aile volante à propulsion hydrogène.

Le premier avion est un turbopropulseur à hydrogène (voir fig. 6.8).

L'hydrogène, qui remplace le kérosène, est brûlé dans la chambre de combustion et le gaz résultant se détend dans le 3^e étage de la turbine dont la rotation de l'axe entraîne l'hélice.

La turbopropulsion hydrogène est associée aux vols régionaux (courts courriers) d'un rayon d'action inférieur à 1 800 km. Il transporte moins de 100 passagers.

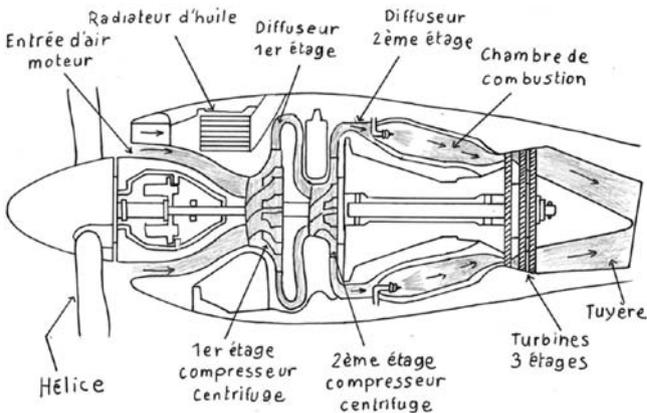


Figure 6.8 | Schéma d'un turbopropulseur.

Le turboréacteur (voir fig. 6.9), ou le turbofan (voir fig. 6.10) à hydrogène sont associés à deux types d'avions, le A380 et l'aile volante

(*Blended-Wing Body*) qui sont des moyens-courriers d'un rayon d'action inférieur à 3 500 km et transportant moins de 200 passagers.

Dans le turboréacteur, les gaz brûlés résultant de la combustion de l'hydrogène se détendent dans la turbine et génèrent une poussée en s'éjectant par la tuyère.

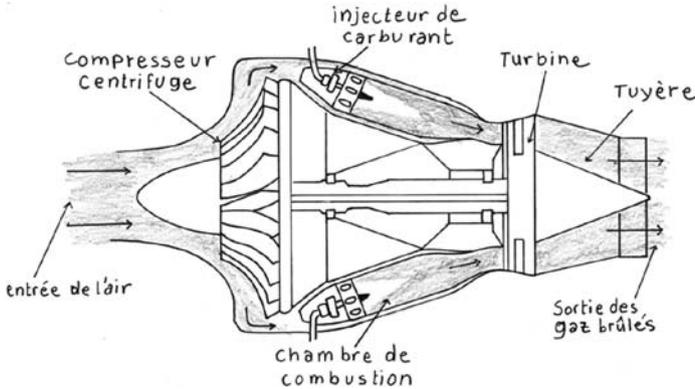


Figure 6.9 | Coupe d'un turboréacteur standard.

Dans le turbofan (ou turboréacteur à double flux), contrairement au turboréacteur, la poussée n'est pas obtenue seulement par l'éjection des gaz brûlés dans la chambre de combustion du réacteur, mais aussi par le flux d'air froid qui est aspiré par la partie extérieure du compresseur.

Le planning prévisionnel de l'entrée en service des ZEROe d'Airbus est le suivant :

- 2022 : lancement du projet de démonstrateur propulsé à l'hydrogène au sol ;
- 2023 : lancement du projet de démonstrateur propulsé à l'hydrogène en vol ;
- 2024 : choix final des technologies utilisées ;
- 2026 : premier vol du démonstrateur propulsé à l'hydrogène ;
- 2028 : lancement du programme de fabrication des appareils ;
- 2035 : entrée en service des appareils ZEROe.

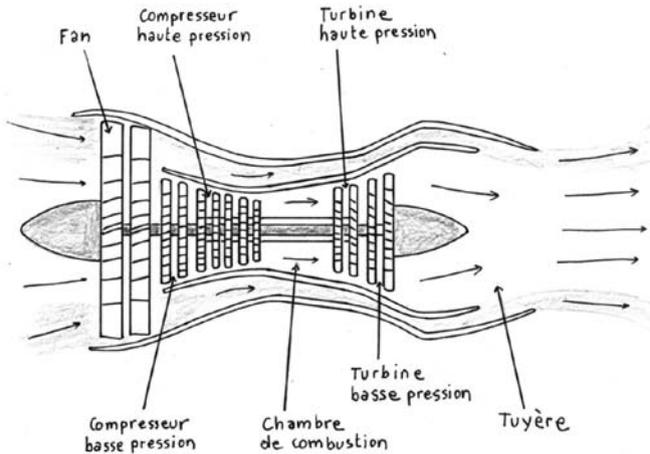


Figure 6.10 | Schéma d'un turbofan.

Stratégie climatique d'Airbus

La stratégie climatique d'Airbus consiste à examiner simultanément plusieurs voies de développement de nouveaux combustibles.

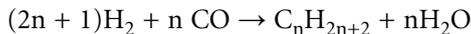
- Le carburant d'aviation durable (SAF)

Le SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) est à base de biomasse (huile de cuisson usée, déchets, résidus).

Tous les avions Airbus sont certifiés pour fonctionner aujourd'hui jusqu'à 50 % de mélange SAF avec une perspective de 100 % SAF à court terme.

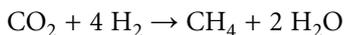
- Le carburant de synthèse (PtL, *Power-to-Liquid*)

C'est du kérosène de synthèse obtenu à partir du CO et de H₂ par le procédé Fischer-Tropsch (voir fig. 6.11).



n peut varier à partir de n = 2 (éthane C₂H₆) pour obtenir des hydrocarbures saturés supérieurs (propane C₃H₈, butane C₄H₁₀...).

Pour n = 1 (méthane CH₄), on utilise le procédé Sabatier, à partir du CO₂ et de H₂ :



Le Starship de Elon Musk, destiné aux premiers voyages vers la planète Mars de la société SpaceX, utilise comme combustible du méthane à la place de l'hydrogène.

Le problème est qu'il n'y a pas assez de méthane pour le vol de retour.

Par conséquent, il est prévu de produire du méthane *in situ*, c'est-à-dire sur Mars par le procédé de Sabatier, le CO₂ provenant de l'atmosphère de Mars et l'hydrogène étant produit par électrolyse à partir de l'eau présente sur cette planète.

Le procédé de Fischer-Tropsch fut inventé en 1923 par deux chimistes allemands. Il fut notamment utilisé en Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale pour produire de l'essence à partir du charbon.

Safran commercialise un moteur fonctionnant à 50 % avec du kérosène de synthèse.

Comme l'indique la figure 6.11, l'obtention des gaz de synthèse est facilitée par l'introduction de catalyseurs.

Les catalyseurs utilisés pour obtenir des hydrocarbures, dont le kérosène qui est un mélange d'hydrocarbures avec n compris entre 10 (C₁₀H₂₂) et 14 (C₁₄H₃₀), sont le fer, le cobalt ou le ruthénium.

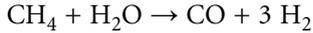
Il est à noter que le procédé Fischer-Tropsch appliqué à la biomasse respecte la neutralité carbone, puisque le CO utilisé dans le procédé provient du CO₂ qui a été extrait de l'atmosphère pour fabriquer de la biomasse par photosynthèse.

C'est ce même carbone qui est restitué à l'atmosphère par l'hydrocarbure créé dans le procédé Fischer-Tropsch, d'où la « neutralité » carbone résultant d'un bilan carbone nul.

À l'évidence, lorsque le CO provient du charbon ou du gaz, le procédé de Fischer-Tropsch ne respecte pas la neutralité carbone !

Le méthane provient des gisements de gaz naturel, des mines de charbon (le grisou) ou de la roche mère (le gaz de schiste).

Le CO est alors produit par réaction du méthane avec l'eau :



C'est la première équation chimique du vaporeformage (voir Chapitre 2).

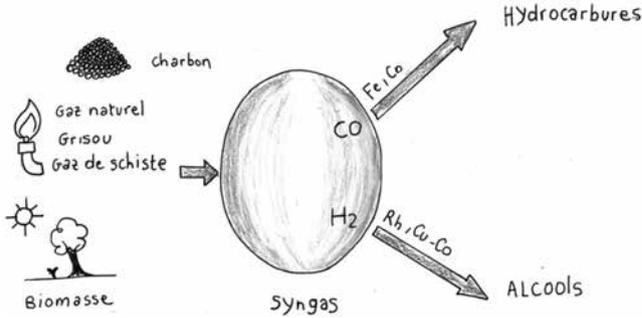


Figure 6.11 | Procédé de Fischer-Tropsch.

Airbus considère que le PtL possède un énorme potentiel, non seulement en termes d'impact sur le climat, mais également en termes de coût et d'évolutivité.

La disponibilité de l'hydrogène vert pour alimenter les avions est un défi majeur.

Pour être « vert », l'hydrogène doit remplir deux conditions :

- être produit par un procédé décarboné. Seule l'électrolyse le permet puisque les autres procédés de production font appel à l'énergie fossile (voir chapitre 2) ;
- l'électricité nécessaire à l'électrolyse doit provenir des énergies renouvelables ou nucléaire (voir fig. 6.12).

Le trafic d'un aéroport comme l'aéroport Charles-de-Gaulle est tel qu'il sera impossible dans les prochaines décennies d'imaginer que la logistique permettra d'assurer des approvisionnements suffisants en hydrogène.

Dans ces conditions, soit on diminue drastiquement le trafic aérien, ce qui n'est pas souhaitable car cela supposera un ralentissement de

la croissance économique, c'est-à-dire une récession, soit on cherche d'autres carburants en complément de l'hydrogène.

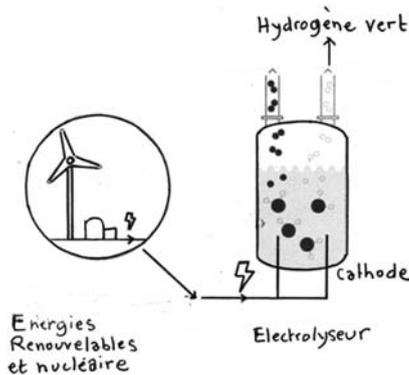


Figure 6.12 | La production de l'hydrogène vert.

S'il veut atteindre l'objectif de la neutralité carbone en 2050, Airbus considère donc qu'il lui faudra faire appel aux carburants alternatifs cités plus haut et, finalement, en 2050, Airbus disposera d'un panachage des nouveaux carburants : hydrogène, kérosène de synthèse (PtL), carburant à base de biomasse (SAF).

Dans un cadre plus général, le secteur aérien international, sous l'égide de l'ATAG (Groupe d'action interprofessionnel du transport aérien), a sorti le rapport Waypoint 2050 en 2022 qui analyse les scénarios possibles permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050, comme cela a été demandé lors de la COP 26 en novembre 2021 à Glasgow.

Le scénario finalement retenu évalue les différentes contributions à la réduction des émissions de CO₂ en 2050. Les principales contributions sont les développements technologiques (34 %) et l'utilisation de carburants de type SAF (53 %) (voir fig. 6.13).

À l'analyse des innovations technologiques de rupture, il apparaît clairement dans le rapport que l'utilisation de l'hydrogène, en tant que carburant pour l'aviation, est vivement recommandée.

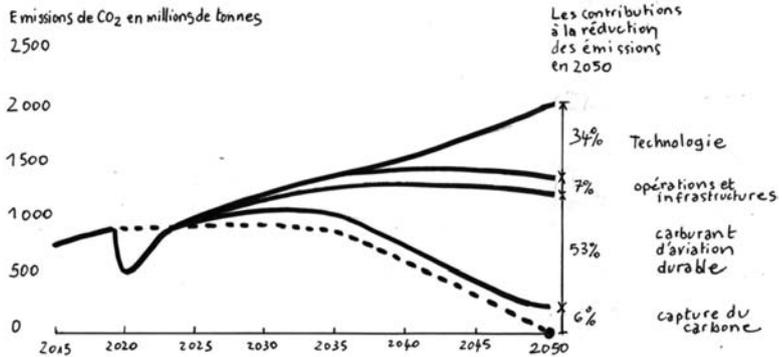


Figure 6.13 | Objectif COP 26 à Glasgow (11/2021) : neutralité carbone en 2050.

L'hydrogène interviendra, soit dans une réaction thermique pour alimenter des moteurs traditionnels, soit dans une réaction chimique pour alimenter une PAC connectée à un moteur électrique.

La suppression de la consommation d'hydrocarbure est préconisée.

Les conclusions du rapport Waypoint 2050 peuvent se décliner comme suit :

- L'aviation civile ne représente que 3 % des émissions mondiales de CO₂ en 2022.

- Les trajectoires de décarbonation seront très différentes selon le segment passager considéré :

- Vols régionaux (9-10 et 50-100 sièges)

3 % des émissions de CO₂ du secteur aéronautique mondial :

Propulsion PAC ou hybride (PAC + batterie/PAC + turbo-propulseur)

- Vol courts et moyens-courriers (100-250 sièges)

67 % des émissions de CO₂ du secteur aéronautique mondial :

Propulsion turboréacteur hydrogène

- Vols longs-courriers (> 250 sièges)

30 % des émissions de CO₂ du secteur aéronautique mondial :

Propulsion turboréacteur SAF

LE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE LIQUIDE

Le stockage de l'hydrogène dans l'avion ZEROe nécessite une approche spécifique.

H₂ fournit 3 fois l'énergie du kérosène par unité de masse (et 100 fois celle des batteries lithium-ion), mais moins d'énergie par unité de volume :

1 litre de kérosène = 3 000 litres H₂ à la pression de 1 bar, d'où la nécessité de liquéfier H₂.

Alors, 1 litre de kérosène = 4 litres d'hydrogène liquide (LH₂), d'où la nécessité de fabriquer un réservoir spécifique.

Caractéristiques du réservoir LH2 de l'Airbus ZEROe

Il se compose de 2 réservoirs (intérieur et extérieur) (voir fig. 6.14), séparés par le vide avec un matériau spécifique, tel le MLI (*Multi-Layer Insulation*) pour minimiser le transfert thermique par rayonnement.

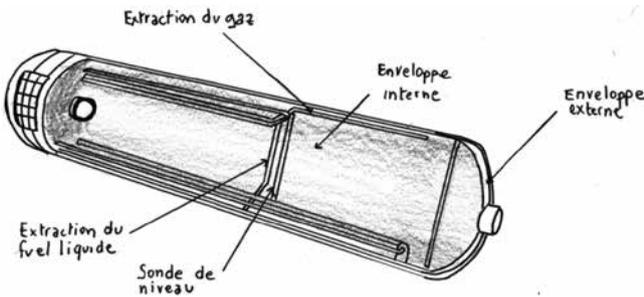


Figure 6.14 | Écorché d'un réservoir d'hydrogène liquide pour l'aviation.

Airbus exploitera le savoir-faire de l'aérospatial, mais les réservoirs cryogéniques des avions devront supporter 20 000 décollages et atterrissages et devront conserver l'hydrogène à l'état liquide beaucoup plus longtemps.

D'abord métalliques, on étudiera ensuite des réservoirs en matériaux composites afin de gagner en poids et en coût de fabrication.

L'HYDROGÈNE POUR DÉCARBONER L'AVIATION LÉGÈRE

La pile à combustible peut être utilisée pour la propulsion des petits avions de l'aviation générale mais l'utilisation de l'hydrogène en est à ses débuts dans ce segment de marché.

C'est alors la pile à membrane PEMFC qui est le mieux adaptée.

Les deux principaux problèmes à résoudre sont :

- la densité d'énergie de la PAC ;
- l'encombrement du réservoir de LH₂.

En ordre de grandeur, on peut actuellement stocker 30 kg de LH₂ pour alimenter une pile à combustible de 70 kW afin de faire voler, pendant 6 heures, un avion du type Cessna de 4 places en complète autonomie.

Peu de constructeurs d'avions sont actuellement sur ce marché.

Citons Zeroavia et son prototype Piper Malibu Mirage qui est hybride batterie/PAC hydrogène (voir fig. 6.15).



Figure 6.15 | Le piper Malibu Mirage de Zeroavia.

Citons également, plus petit, le démonstrateur F2e à hydrogène du projet HYFLY de Flight Design. Le début prévisionnel des tests est fixé à 2023 (voir fig. 6.16).

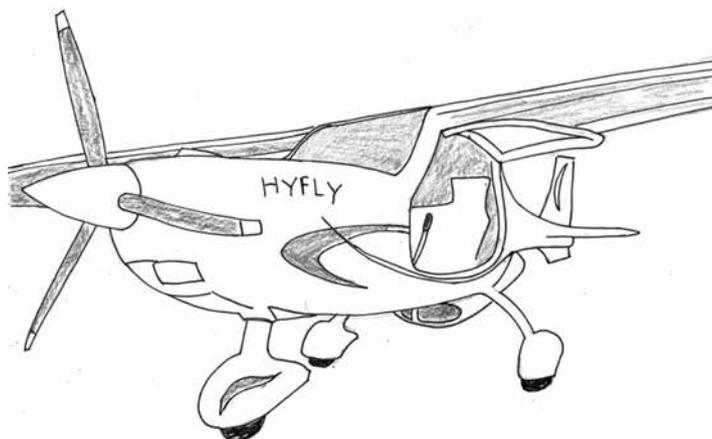


Figure 6.16 | Le démonstrateur F2e du projet HYFLY (Flight Design).

7

L'hydrogène, un carburant pour les mobilités spatiales

QUELQUES RAPPELS HISTORIQUES

L'industrie spatiale est le plus gros consommateur mondial d'hydrogène liquide.

En particulier, les navettes spatiales américaines (1981-2011) furent propulsées par les ergols hydrogène et oxygène liquides (LH₂ et LOx).

Il en est de même aujourd'hui des principaux lanceurs de la planète : Saturn puis SLS (États-Unis), Ariane (Europe), Soyouz (Russie), Chang Zheng (Chine)...

Le démarrage de cette fantastique épopée remonte au début du xx^e siècle, lorsqu'en 1906, Robert Goddard imagina d'utiliser l'énergie nucléaire pour la propulsion spatiale, bien avant la propulsion chimique inaugurée par les missiles V2 à ergols liquides de Wernher von Braun en 1943 dans l'Allemagne du Troisième Reich (voir fig. 7.1), ou leur généralisation à la fin des années cinquante avec l'avènement des lanceurs spatiaux.

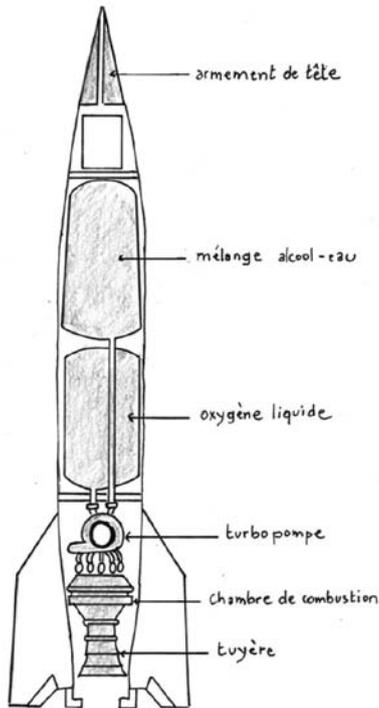


Figure 7.1 | Le missile V2 de Wernher von Braun (1943).

Dans l'esprit de Goddard, l'énergie nucléaire ne provenait pas de la fission d'un noyau fissile, comme l'uranium 235 ou le plutonium 239, qui n'était pas encore connue à cette époque (la découverte de la fission nucléaire par Lise Meitner date des années trente), mais de l'énergie dégagée par la radioactivité, découverte quelques années plus tôt, en 1896, par Henri Becquerel.

Très vite, Goddard comprit que la radioactivité dégageait une puissance trop faible (de l'ordre de quelques kilowatts), et par conséquent fournissait une poussée insuffisante pour satisfaire aux besoins de la propulsion, et son idée fut rapidement abandonnée.

Cependant, l'utilisation de la radioactivité refit surface quelques décennies plus tard, non pas à des fins de propulsion, mais pour

assurer les deux fonctions suivantes à bord d'un satellite ou d'une sonde spatiale :

- **Fourniture de la chaleur** nécessaire pour maintenir l'intégrité d'équipements sensibles à la température, grâce à un RHU (*Radioisotope Heater Unit*) qui est un petit composant utilisant le plutonium 238 (cet isotope du plutonium n'est pas fissile, mais simplement radioactif, avec une période de 88 ans et une activité de 633 GBq/g, principalement en rayonnement α) ou l'américium 241 (d'une période de 432 ans et une activité de 127 GBq/g, également en rayonnement α).

- **Fourniture de l'électricité** embarquée grâce à un RTG (*Radioactive Thermoelectric Generator*) qui utilise le principe du thermocouple, la source chaude étant fournie par un radioisotope du type Pu238, Am241 ou Po210 et la source froide, par l'espace sidéral.

Il est à noter que le RTG peut servir également à la propulsion d'astromobiles, par exemple les rovers Curiosity (voir fig. 7.2) et Perseverance qui furent déposés sur la planète Mars respectivement en 2012 et 2021.

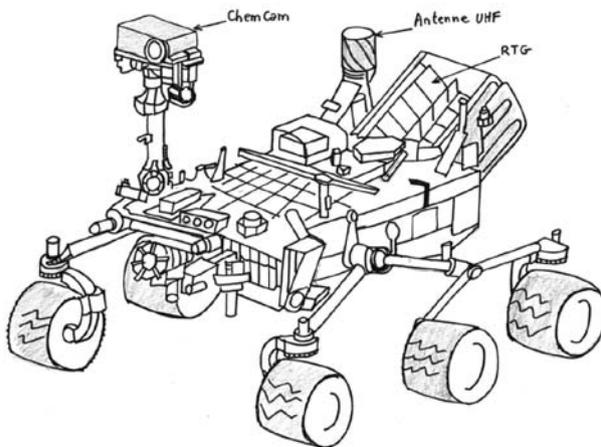


Figure 7.2 | Le rover Curiosity avec, à l'arrière du véhicule, son RTG qui actionne les roues par l'intermédiaire d'un moteur électrique.

LA RADIOACTIVITÉ À LA CONQUÊTE DE L'ESPACE

Depuis plusieurs décennies, l'énergie nucléaire produite par la désintégration radioactive a été utilisée, comme nous venons de le voir, pour le chauffage des instruments sensibles (RHU), pour l'alimentation électrique de l'instrumentation embarquée (RTG), ou encore pour l'alimentation électrique de moteurs électriques, pour la propulsion d'astromobiles (RTG).

La figure 7.3 présente des exemples d'utilisation de la radioactivité dans l'espace.

Les différents types de mobilités considérées sont :

- les fusées ;
- les satellites artificiels ;
- les sondes spatiales ;
- les robots.

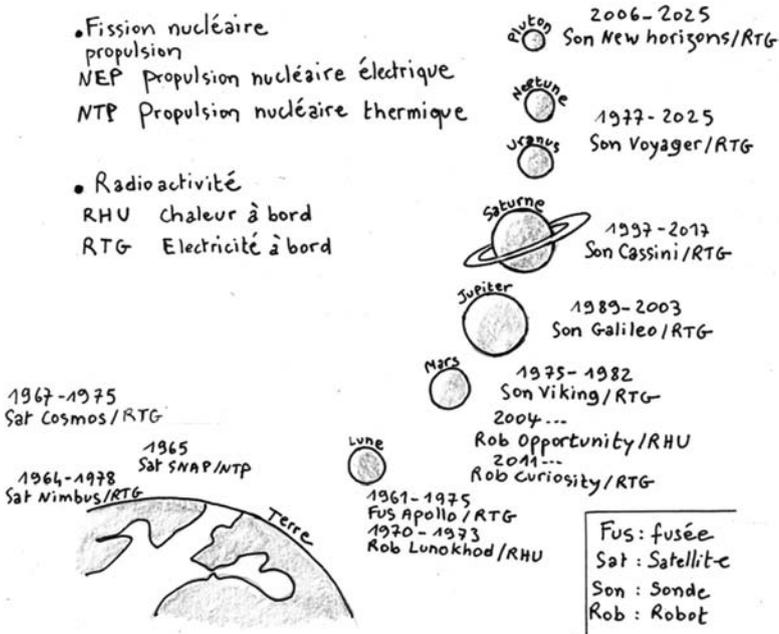


Figure 7.3 | L'atome à la conquête du système solaire.

Les missions scientifiques associées ont visé à mieux connaître les planètes du système solaire et leur environnement. Les utilisations du RHU et du RTG ont été décrites précédemment.

À titre d'exemple, la mission Cassini-Huygens a consisté à explorer les environs de la planète Saturne et tout particulièrement Titan, son plus grand satellite naturel.

Avec un diamètre 6 % plus grand que Mercure, c'est le seul satellite naturel connu de Saturne à posséder une atmosphère dense.

Découvert par Huygens en 1655, son épaisse atmosphère a longtemps empêché l'observation de sa surface, jusqu'à l'arrivée de la mission Cassini-Huygens (voir fig. 7.4.) en 2004.

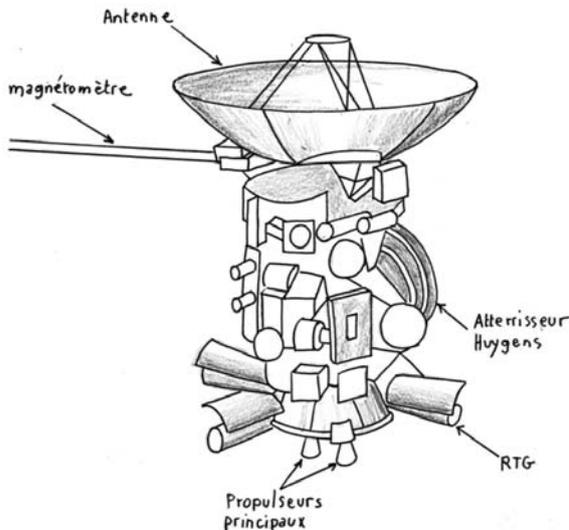


Figure 7.4 | La sonde Cassini-Huygens.

Cette dernière a permis de découvrir des lacs d'hydrocarbures liquides dans les régions polaires du satellite naturel.

Du point de vue géologique, la surface de Titan est jeune, son atmosphère est composée de 98,4 % de dioxyde d'azote (N_2) et 1,6 % de méthane (CH_4) et d'éthane (C_2H_6).

Titan est globalement comparable à la Terre primitive, mais à des températures beaucoup plus basses. On considère qu'il pourrait peut-être héberger une forme primitive de vie extraterrestre...

La sonde spatiale Cassini-Huygens a été développée par la NASA, avec la participation de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Agence spatiale italienne (ASI).

Lancée en 1997, Cassini, la partie « orbiteur » de la sonde, se déplace autour de Saturne à partir de 2004.

En 2005, Huygens, sa partie « atterrisseur », se pose sur Titan afin d'étudier le sol du satellite.

L'énergie de la sonde provient de 3 RTG au plutonium 238.

LA PROPULSION D'UNE FUSÉE

La troisième loi de Newton, qui énonce l'égalité entre l'action et la réaction, implique la définition de deux notions fondamentales de l'aéronautique, introduites au tout début du xx^e siècle par le physicien russe Constantin Tsiolkovski, pour évaluer les performances d'une fusée : la poussée (F), qui se mesure en newton (ou converti en masse [tonne] pour la communication grand public) et l'impulsion spécifique (Isp), qui se mesure en seconde.

$$F = q \cdot V_{ej}$$

et la puissance P de la fusée qui s'en déduit :

$$P = \frac{1}{2} F \cdot V_{ej}$$

$$Isp = P/q \cdot g$$

avec :

q : débit massique du gaz propulsif ;

V_{ej} : vitesse d'éjection du gaz propulsif ;

g : accélération de la pesanteur.

Ainsi, la poussée étant une force, plus elle est importante et plus vite le vaisseau spatial atteindra des vitesses élevées.

Par ailleurs, pour une même poussée, plus l'impulsion spécifique est grande et moins on consommera de gaz propulsif.

En d'autres termes, l'impulsion spécifique indique la durée pendant laquelle 1 kg de propergol peut fournir une poussée équivalente à 1 kg.

La poussée fournie au vaisseau pendant un certain temps permet d'obtenir un incrément de vitesse ΔV :

$$\Delta V = V_{ej} \ln \frac{M_i}{M_f}$$

avec M_i et M_f : masses initiale et finale du vaisseau.

La différence entre la masse initiale et la masse finale correspond aux ergols brûlés.

Cette quantité est d'autant plus faible pour un même incrément de vitesse que la vitesse d'éjection est élevée.

Les lanceurs sont constitués de plusieurs étages propulsifs, qui entrent tour à tour en fonctionnement.

En larguant progressivement les étages devenus inutiles, dès que leurs réservoirs se sont vidés, le lanceur est considérablement allégé et peut accroître sa vitesse. Cette condition est nécessaire pour contrecarrer l'attraction terrestre et éviter que le lanceur ne retombe accidentellement.

Un lanceur a une forme cylindrique. Il comprend entre 2 et 4 étages qui renferment les volumineux réservoirs.

Le 1^{er} étage est souvent entouré de boosters de propergols solides destinés à augmenter la poussée au décollage.

Cette simplicité de conception est entravée par une complexité dans la réalisation pratique car, au-delà des problèmes évidents de sécurité liés notamment aux propriétés physico-chimiques de l'hydrogène (voir chapitre 1), un lanceur multiétage doit nécessairement comporter au moins un moteur par étage.

La coiffe permet de protéger la charge utile des frottements de l'air pendant la traversée de l'atmosphère. En cas de lancement double, les deux satellites embarqués sont fixés à une structure porteuse.

La fusée Ariane V

La mission d'un lanceur du type Ariane V (voir fig. 7.5) a pour objectif de positionner sur orbites basses des satellites artificiels destinés à remplir des fonctions dans des domaines spécifiques, par exemple :

- la météorologie (Météosat...);
- les télécommunications (Eutelsat...);
- l'astronomie (Hubble...);
- la climatologie (Calipso...);
- la géolocalisation (Galileo...);
- ...

L'étage principal cryogénique (EPC) d'Ariane V constitue le premier étage de la fusée. Il est composé de 2 réservoirs d'ergols (hydrogène liquide [LH₂] et oxygène liquide [LOx]) et du moteur cryogénique Vulcain (voir fig. 7.6). Cet étage est mis à feu dès le décollage, en même temps que les boosters à poudre (EAP) qui l'entourent, l'ensemble fournissant une poussée de 1 344 tonnes dans le vide.

Puis, il assure seul la propulsion du lanceur pendant la deuxième phase du vol, après le largage des boosters (environ 2 minutes après le décollage).

Le deuxième étage, également propulsé par des ergols liquides LH₂ et LOx, fonctionne pendant la troisième phase du vol avant le largage des satellites embarqués à proximité de leur orbite.

Précisément, selon les missions, les satellites ne sont pas tout à fait largués sur leur orbite lorsqu'ils se séparent du 2^e étage du lanceur.

Les opérations de mise à poste, contrôlées depuis la Terre, leur permettent de se positionner correctement sur leur orbite.

Les satellites disposent ainsi de moyens de propulsion propres, qui leur permettent d'effectuer des manœuvres et de rectifier leur trajectoire si nécessaire.

La technologie est aujourd'hui éprouvée de longue date et le taux de réussite d'un tir est supérieur à 96 % pour plus de 20 années de service.

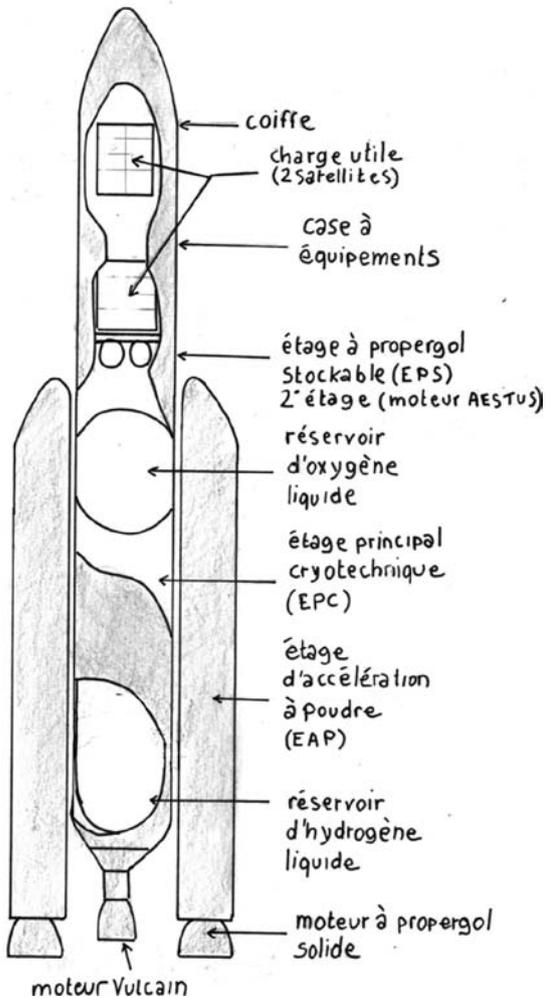


Figure 7.5 | Schéma de principe de la fusée Ariane V.

Les séquences standards d'un vol d'Ariane figurent sur le tableau 7.1.

Tableau 7.1 | Séquences d'un vol standard d'Ariane.

TEMPS (seconde)	ÉVÉNEMENT	ALTITUDE (km)	VITESSE (m/s)
H0	Allumage du 1 ^{er} étage cryotechnique	0	0
H0 + 7 s	Allumage des étages d'accélération à poudre EAP	0	0
H0 + 7,3 s	Décollage	0	0
H0 + 2 min 22 s	Séparation des EAP	66	2 065
H0 + 3 min 16 s	Largage de la coiffe	106	2 320
H0 + 9 min 36 s	Extinction du moteur Vulcain	145	7 778
H0 + 9 min 42 s	Séparation du 1 ^{er} étage	147	7 787
H0 + 9 min 48 s	Allumage du 2 ^e étage	151	7 793
H0 + 26 min 33 s	Extinction du 2 ^e étage	1 664	8 557
H0 + 29 min 49 s	Séparation du 1 ^{er} satellite	2 312	8 119
H0 + 32 min 54 s	Séparation de la structure porteuse des satellites	2 996	7 700
H0 + 37 min 00 s	Séparation du 2 ^e satellite	3 968	7 169
H0 + 53 min 28 s	Fin de la mission lanceur	8 024	5 499

La propulsion d'Ariane V

Pour fournir la force propulsive, le moteur Vulcain d'Ariane V (voir fig. 7.6) convertit l'énergie dégagée par la réaction chimique hydrogène/oxygène et la vapeur d'eau produite passe dans une tuyère où elle est accélérée puis éjectée.

Les ergols doivent être conservés aux températures de liquéfaction qui sont très basses (– 253 °C pour l'hydrogène et – 183 °C pour l'oxygène). Leur manipulation est donc particulièrement délicate.

L'hydrogène étant très peu dense, les réservoirs sont volumineux et les turbopompes puissantes pour obtenir les pressions et les débits souhaités.

Vulcain est un moteur très performant : il génère une vapeur d'eau très chaude, éjectée beaucoup plus vite qu'avec les autres ergols du marché (par exemple le méthane du lanceur Starship de la société SpaceX), permettant ainsi une économie significative de carburant.

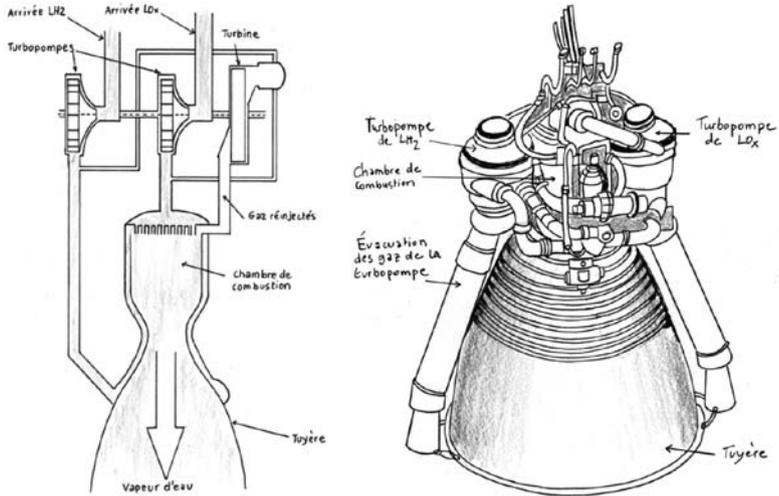


Figure 7.6 | Le moteur Vulcain d'Ariane V.

LA PROPULSION NUCLÉAIRE ET LA PROBLÉMATIQUE D'UN VOYAGE VERS LA PLANÈTE MARS

L'énergie disponible par unité de masse d'un élément fissile est approximativement un million de fois supérieure à celle produite par la meilleure réaction chimique (hydrogène/oxygène) qui chauffe le gaz avant de le détendre dans la tuyère.

Aussi l'idée d'utiliser un réacteur nucléaire pour chauffer un gaz propulsif est-elle particulièrement attractive.

Les Russes lancèrent durant la guerre froide une trentaine de satellites espions dotés de réacteurs nucléaires à uranium très enrichi.

Deux d'entre eux se désintégrèrent accidentellement et retombèrent de façon incontrôlée sur la Terre.

Il s'agit de Cosmos 954 et Cosmos 1402, dont les missions étaient de surveiller les porte-avions et les sous-marins de l'OTAN.

Le premier tomba au Canada en 1978, le deuxième, dans l'océan Indien quelques années plus tard.

Cependant, leurs réacteurs nucléaires embarqués n'étaient pas destinés à la propulsion, mais à la production d'électricité pour les besoins internes des satellites.

Cosmos 954 fit du Canada le théâtre du premier accident nucléaire spatial de l'histoire. Par chance, ses débris tombèrent dans une zone inhabitée et se dispersèrent de sorte qu'il n'y eut aucune conséquence radiologique dans la biosphère.

La conservation de l'énergie d'un gaz chaud qui se détend dans une tuyère fait apparaître que cette vitesse d'éjection est proportionnelle à $\sqrt{T/M}$ où T est la température dans la tuyère et M la masse molaire du gaz éjecté.

Lors de la combustion chimique hydrogène/oxygène, la température T atteinte dans la tuyère est de l'ordre de 3 500 K pour une masse molaire de 18 g/mol.

En considérant de l'hydrogène chauffé par un réacteur nucléaire jusqu'à des températures de « seulement » 2 000 K, un facteur 2 est vite gagné sur la vitesse d'éjection et donc sur la consommation d'ergol.

Cette estimation rapide des ordres de grandeur montre que l'énergie nucléaire ouvre la voie à une nouvelle gamme de propulseurs là où les propulseurs chimiques ont atteint leurs meilleures performances avec le couple H_2/O_2 .

Les vaisseaux spatiaux pour des missions interplanétaires

Les missions spatiales proches de la Terre pour les applications commerciales par satellite (télécommunication, localisation, image-rie...) sont couvertes par la propulsion chimique classique des lanceurs.

Pour une mission automatique vers la planète Mars, où la durée du voyage n'est pas un facteur déterminant et où la charge utile est modeste, la propulsion chimique reste encore la meilleure option.

En revanche, pour une mission habitée, la charge utile à déposer sur Mars est de l'ordre de 30 tonnes et la durée du voyage doit être la plus courte possible.

Le déroulement d'une mission moderne consiste à déposer, au moyen d'un lanceur lourd conventionnel du type Ariane V, un vaisseau spatial sur une orbite terrestre basse (500 km). Ce vaisseau est ensuite propulsé vers une orbite martienne à partir d'une trajectoire elliptique dite de transfert.

La propulsion nucléaire est, comme nous venons de le voir, une solution à retenir.

La trajectoire de transfert de Hohmann

Les orbites de la Terre et de Mars autour du Soleil ne sont pas synchronisées.

En effet, Mars effectue le tour du Soleil en 687 jours alors que la Terre le fait en 365 jours. Par ailleurs les orbites sont elliptiques avec le Soleil pour foyer et leurs plans de révolution respectifs forment un angle non nul.

Le calcul montre que la distance entre ces deux planètes peut ainsi varier de 55 à 400 millions de kilomètres.

En conséquence, il existe une étroite fenêtre de lancement, pendant laquelle cette distance est minimale, situation qui revient périodiquement tous les 26 mois environ.

L'économie maximale de carburant correspond à une ellipse de transfert qui tangente les orbites de la Terre et de Mars tout en tenant compte des contraintes de la fenêtre de lancement.

Dans ces conditions, l'impulsion positive donnée au vaisseau pour passer de l'orbite terrestre à l'ellipse de transfert vers Mars sera minimale.

Il en est de même de l'impulsion également positive donnée au vaisseau pour passer de l'ellipse de transfert à l'orbite martienne souhaitée.

A contrario, on appliquera au retour une impulsion négative pour sortir de l'orbite de Mars et une impulsion également négative pour revenir sur l'orbite terrestre initiale.

Cette ellipse s'appelle la trajectoire de transfert de Hohmann (voir fig. 7.7) et elle donne une durée du trajet Terre-Mars de 258 jours.

Cependant, cette durée de vol est excessive pour un vol habité car la durée du voyage aller-retour Terre-Mars pénaliserait dangereusement la santé psychique (éloignement prolongé de la Terre et conditions de survie difficiles sur un sol hostile) et physiologique (atteintes musculaire, osseuse et neurologique) des astronautes, sans compter les risques sanitaires liés à l'exposition aux rayonnements cosmiques (voir § « Les rayonnements cosmiques », plus loin dans ce chapitre).

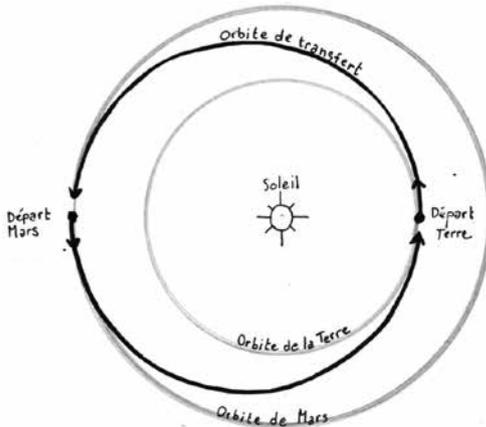


Figure 7.7 | La trajectoire de transfert de Hohmann.

La trajectoire standard de transfert Terre-Mars

Afin de raccourcir à environ 7 mois la durée du vol Terre-Mars, on utilise des trajectoires sécantes, c'est-à-dire non tangentielles (voir fig. 7.8).

Dans le passé, on cherchait à minimiser le temps de présence sur Mars que l'on pensait particulièrement hostile à l'Homme, notamment vis-à-vis des radiations.

On préférait alors le scénario en opposition (voir fig. 7.8-B). Le temps de séjour sur Mars était réduit à 30 jours. Dans ces conditions,

le voyage aller durait 217 jours mais le voyage de retour durait 403 jours, au cours duquel le vaisseau était dirigé vers Vénus afin de profiter de son attraction gravitationnelle pour être relancé vers la Terre.

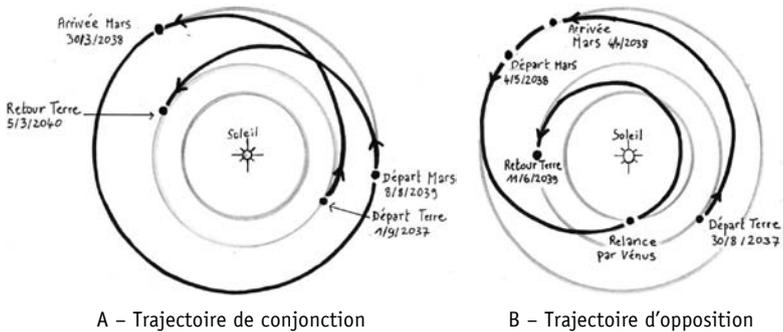


Figure 7.8 | Les trajectoires de conjonction et d'opposition.

Aujourd'hui, on préfère le scénario de conjonction (voir fig. 7.8-A).

En effet, on y trouve plusieurs avantages :

- Le rayonnement cosmique est plus agressif dans l'espace alors qu'on peut s'en protéger partiellement sur Mars.
- Ce scénario nécessite moins de carburant.
- Le séjour sur Mars est plus long et permet de mieux étudier, voire « coloniser » cette planète.

On obtient alors les durées suivantes pour un voyage aller/retour :

- Vol aller : 210 jours
- Séjour sur Mars : 496 jours
- Vol retour : 210 jours
- Total voyage A/R : 916 jours (2,5 années)

Dans les deux scénarios, les doses reçues par l'équipage sont à peu près similaires et varient entre 500 et 1 000 mSv, selon l'activité solaire.

En conséquence, des progrès doivent encore être réalisés, du point de vue de la radioprotection, pour réduire ces doses à des valeurs

qui se rapprochent au mieux du seuil d'innocuité de 100 mSv (voir § « Les rayonnements cosmiques », plus loin dans ce chapitre).

Des axes de recherche sont en cours de développement aujourd'hui.

Une des solutions investiguées consiste à créer autour du vaisseau un champ électromagnétique de petite dimension qui ait la même fonction de radioprotection que la magnétosphère pour le terrien (voir fig. 7.9).

Cependant, cette solution, si elle s'avère réalisable, ne verra pas le jour avant la deuxième moitié du siècle. Aussi ne pourra-t-on pas en bénéficier lors des premiers vols habités vers la planète rouge.

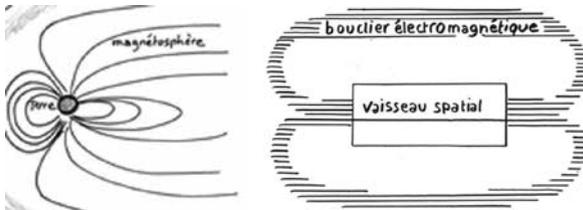


Figure 7.9 | Magnétosphère et bouclier électromagnétique.

NOTION DE DOSES RADIOACTIVES

Les doses considérées sont des doses efficaces.

Elles représentent l'énergie déposée par kilogramme de matière organique et tiennent compte à la fois du type de rayonnement incident et de la nature de l'organe ciblé.

Dans notre propos, on s'intéresse à la dose « corps entier », qui impacte le corps entier et non un organe spécifique. Elle se mesure en sievert (Sv) et elle est normalisée à l'année.

Selon la valeur de la dose, les conséquences radiologiques sont sensiblement différentes :

- Entre 0 et 100 mSv (millisievert), on n'a jamais constaté à ce jour le moindre effet sanitaire sur l'Homme. C'est une zone d'innocuité radiologique.

On trouve dans cette catégorie la dose annuelle des rayonnements cosmiques (elle est égale à 0,5 mSv au niveau du sol et double tous

les 1 500 m d'altitude), ou la dose annuelle totale de la radioactivité en France, cumulant les sources cosmiques, telluriques, le potassium, le radon et ses descendants (2,5 mSv au niveau du sol, voir tab. 7.2).

Tableau 7.2 | Doses naturelles moyennes en France.

Source	Dose (mSv/an)
Externe	
cosmique	0,5
matériaux	0,5
Interne	
potassium 40	0,2
radon et descendants	1,3
Total	2,5

- Entre 100 mSv et 1 Gy (gray) (équivalent à 1 Sv pour le rayonnement γ), on se situe dans la zone stochastique où l'occurrence d'un effet sanitaire est proportionnelle à la dose reçue mais sa gravité en est indépendante.

Par exemple, un séjour de 6 mois dans l'ISS représente une dose d'environ 150 mSv. La probabilité supplémentaire de développer plus tard un cancer occasionné par ce séjour dans l'espace est faible par rapport à sa probabilité naturelle (quelques %).

- Au-delà de 1 Gy, on entre dans la zone déterministe où l'occurrence et la gravité d'un effet sanitaire sont proportionnelles à la dose reçue.

Cette zone correspond à une forte toxicité des radiations.

La dose létale, qui correspond à 50 % de chances de décéder dans les 30 jours en l'absence d'une intervention médicale, est de 5 Gy.

Notons qu'à l'issue d'un traitement standard du cancer par radiothérapie de 5 semaines, à raison de 5 séances par semaine, le patient a reçu en moyenne une dose de 50 Gy, mais cette valeur très élevée est ciblée sur une tumeur cancéreuse par définition très petite et par conséquent cette valeur n'est à l'évidence pas comparable à une dose « corps entier » qui nous occupe ici.

LES RAYONNEMENTS COSMIQUES

Dans le système solaire, la radioactivité provient du Soleil et des galaxies.

La Terre possède deux écrans successifs pour s'en protéger efficacement : l'atmosphère et la magnétosphère (voir fig. 7.10). La magnétosphère dévie une grande partie des particules chargées provenant de l'espace et les particules qui la traversent pénètrent dans la haute atmosphère où elles interagissent avec des molécules de l'air pour créer des particules cosmiques secondaires qui peuvent parvenir jusqu'à la surface de la Terre (principalement des rayons gamma et des protons) (voir figure 7.11).

On considère que l'atmosphère équivaut, en termes de protection biologique au sol, à une épaisseur de 10 mètres d'eau.

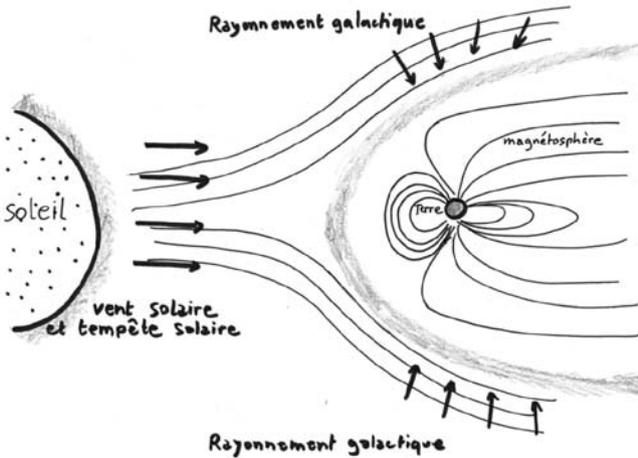


Figure 7.10 | La magnétosphère protège la Terre des rayonnements cosmiques.

Ainsi, alors que la dose naturelle reçue par un habitant en France est en moyenne de 2,5 mSv par année, cette dose est 100 à 150 fois plus importante dans la station internationale ISS et 300 à 400 fois supérieure sur la Lune.

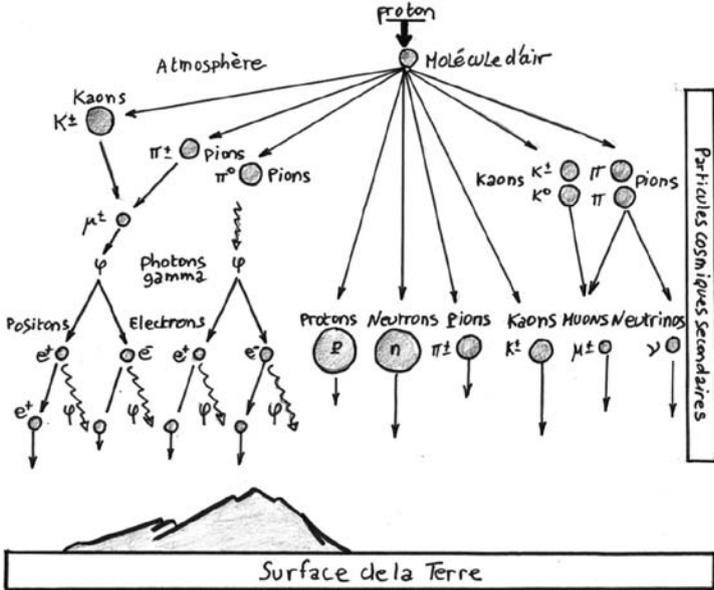


Figure 7.11 | Création par collisions dans les couches supérieures de l'atmosphère des particules cosmiques secondaires.

En outre, au-delà de 500 km de hauteur (l'ISS se trouve sur une orbite à 400 km), l'astronaute entre dans une zone de fortes radiations générées par les ceintures de Van Allen (voir fig. 7.12).

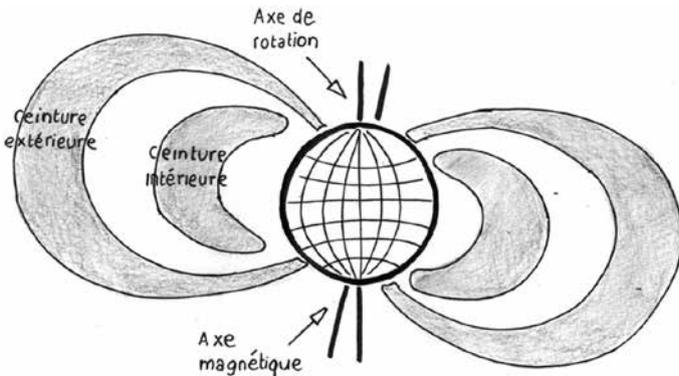


Figure 7.12 | Les ceintures intérieure et extérieure de Van Allen.

L'énergie des rayonnements cosmiques dépend de leur origine, comme l'indique le tableau 7.3.

Tableau 7.3 | Énergie des rayonnements cosmiques en fonction de leur origine.

Origine du rayonnement cosmique	Énergie cinétique par nucléon
Soleil vent solaire éruption solaire	$1 \text{ MeV} < E < 30 \text{ MeV}$ quelques GeV
Galactique principalement supervova	$30 \text{ MeV} < E < 10^2 \text{ GeV}$
Extragalactique origine inconnue	$10^2 \text{ GeV} < E < 10^{11} \text{ GeV}$

En termes de doses reçues sur un trajet Terre-Mars, l'inventaire des rayonnements cosmiques peut se résumer comme suit :

- **Vent solaire**

Protons (90 %), particules α (10 %), plus plasma. La dose est limitée par rapport aux rayonnements galactiques.

- **Éruptions (ou tempêtes) solaires**

Elles sont de loin la cause des plus fortes doses.

Ces éruptions sont principalement des protons très énergétiques. Elles atteignent leur paroxysme en moyenne tous les 11 ans. Les doses peuvent alors atteindre des valeurs plusieurs centaines de fois supérieures à celles du vent solaire (jusqu'à 5 Sv [14/7/1959]).

En 1989, les éruptions solaires causèrent des dommages importants sur le réseau électrique canadien.

- **Ceintures de Van Allen**

Elles se situent entre 500 et 40 000 km de la Terre. Elles sont constituées des particules du vent solaire piégées dans la magnétosphère.

Ces particules provoquent notamment les aurores polaires (boréales et australes) lorsqu'elles pénètrent dans l'atmosphère terrestre à proximité des pôles.

La dose reçue par les astronautes pendant leur traversée (15 min) vaut environ 10 mSv.

• **Rayonnement cosmique galactique et extragalactique**

Il est principalement constitué de protons (85 %), de particules α (13 %) et de particules lourdes (2 %). Il génère une dose d'environ 2 mSv par jour sur un trajet Terre-Mars.

Étant donné les doses radioactives engendrées par les rayonnements cosmiques, on comprend qu'un voyage dans l'espace doit être le plus court possible.

Par exemple, les missions à bord de la station orbitale ISS sont limitées à 6 mois et les murs des zones de la station les plus fréquentées sont renforcés avec du polyéthylène, riche en hydrogène afin de protéger correctement l'équipage contre les neutrons produits dans l'interaction entre les rayons cosmiques et la matière.

Dans un trajet Terre-Mars, on a besoin des meilleurs écrans radiologiques pour protéger les astronautes.

En cas d'une augmentation significative de l'activité solaire (émergence des éruptions solaires), une solution pourrait consister à confiner les astronautes dans des abris dont les murs seraient remplis d'eau.

Durant leur séjour sur Mars, les astronautes peuvent se réfugier dans des abris recouverts de la poussière tapissant le sol martien appelée régolithe ou encore creuser des abris sous terre.

QUELQUES NOTIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA PHYSIQUE DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Le fonctionnement d'un cœur de réacteur nucléaire

Trois ingrédients sont nécessaires à l'établissement de la réaction en chaîne contrôlée : le combustible, le modérateur et le caloporteur.

Ils constituent les composants principaux du cœur d'un réacteur nucléaire.

- Le **combustible** est constitué d'éléments fissiles (uranium, thorium ou plutonium) afin de provoquer par fission le dégagement d'une quantité considérable d'énergie.

- Le **modérateur** a pour fonction de ralentir les neutrons qui sont émis par fission jusqu'à la thermalisation correspondant à l'agitation thermique associée à la température du milieu (eau ordinaire, eau légère, graphite, béryllium...).

À noter que les réacteurs au plutonium ne comportent pas de modérateur, car la fission est plus efficace avec des neutrons rapides qu'avec des neutrons lents. On parle de réacteurs à neutrons rapides (RNR) (voir tab. 7.4).

- Le **caloporteur** est le fluide qui évacue la chaleur dégagée par la fission pour la convertir en vapeur qui va ensuite se détendre dans un turboalternateur pour produire de l'électricité au réseau (eau, sodium, dioxyde de carbone, hélium...). Cette chaleur peut être utilisée autrement, par exemple pour le chauffage urbain, le dessalement de l'eau de mer ou encore la production d'hydrogène par craquage ou électrolyse de l'eau.

À ces trois composants, ajoutons :

- le **réflecteur**, qui réfléchit les neutrons vers l'intérieur du cœur afin d'éviter de trop les perdre par fuite hors du cœur (béryllium, acier), et

- les **barres absorbantes** (bore, cadmium, hafnium, gadolinium...) qui capturent les neutrons afin de réduire (barres de contrôle) ou d'arrêter (barres d'arrêt d'urgence) la réaction en chaîne.

Le cœur se trouve dans la cuve du circuit primaire (voir fig. 7.13 et fig. 7.14).

Les principaux concepts de réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde sont présentés sur le tableau 7.4.

Tableau 7.4 | Les différentes conceptions de centrales nucléaires en activité dans le monde en fonction des 3 paramètres : modérateur, caloporteur et combustible.

Filières regroupées	Filière	Caloporteur	Modérateur	Combustible
Graphite-gaz	AGR MGUNGG HTR	CO ₂ (Réacteur avancé)	Graphite	UO ₂ enrichi
		CO ₂ (Magneox) He (haute température)	Graphite Graphite	U naturel UO ₂ , UC ₂ , ThO ₂
Eau lourde	PHWR	Eau lourde sous pression	Eau lourde	UO ₂
Eau ordinaire	BWR PWR/VVER	Eau ordinaire bouillante	Eau ordinaire	UO ₂ /MOX
		Eau ordinaire sous pression	Eau ordinaire	UO ₂ /MOX
Neutrons rapides	Surgénérateur	Sodium	Pas de modérateur	MOX
Eau-graphite	RBMK	Eau ordinaire bouillante	Graphite	UO ₂ faiblement enrichi
Eau ordinaire-eau lourde	ATR	Eau ordinaire bouillante	Eau lourde	UO ₂ enrichi-PuO ₂

On constate que de nombreux matériaux peuvent être utilisés, ce qui constitue la diversité des réacteurs en activité.

La production d'électricité dans une centrale nucléaire REP du parc d'EDF

Le principe de fonctionnement d'une centrale électronucléaire de type REP (Réacteur à eau sous pression), encore appelé PWR (*Pressurized Water Reactor*) dans la terminologie anglo-saxonne, est simple (voir fig. 7.14).

Le circuit primaire se situe à l'intérieur du bâtiment réacteur.

L'eau primaire traverse le cœur en récupérant la chaleur produite par la fission des éléments fissiles concentrés dans des crayons combustibles.

La température de l'eau à la sortie de la cuve est d'environ 300 °C et un pressuriseur maintient la pression du circuit à 155 bars afin que l'eau demeure à l'état liquide.

L'eau primaire transmet ses calories à un circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur et la vapeur créée sort du bâtiment réacteur pour se détendre dans une turbine située en salle des machines.

Un alternateur associé à la turbine produit une électricité qui sera fournie au réseau après le passage par un transformateur.

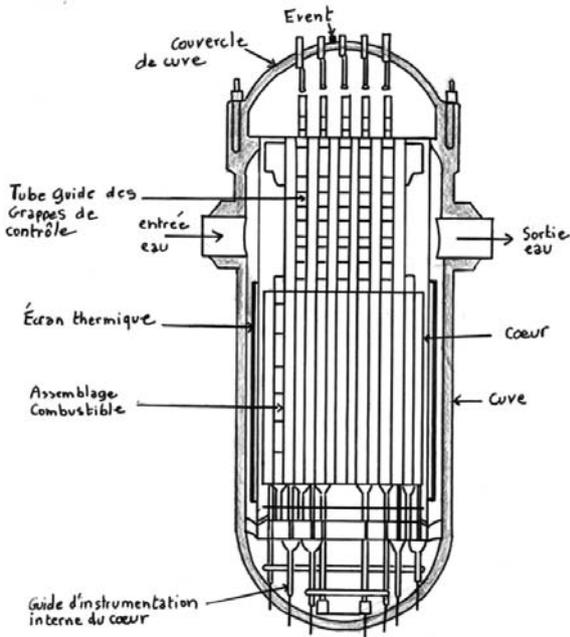


Figure 7.13 | Schéma de la cuve de réacteur REP.

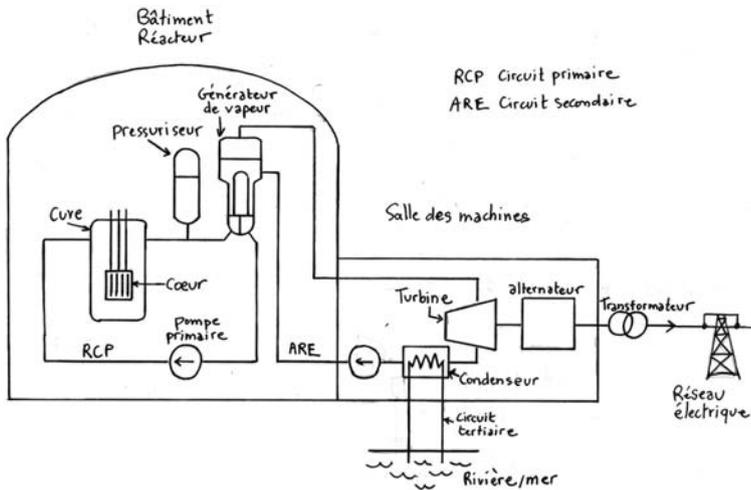


Figure 7.14 | Schéma d'une centrale électro-nucléaire.

AVANTAGES DE LA PROPULSION NUCLÉAIRE DANS UN VOL VERS MARS ET AU-DELÀ

La figure 7.15.A. illustre le besoin en incrément de vitesse (ΔV) pour des transferts martiens en fonction du temps de transfert. Le ΔV correspond à la somme de deux termes :

- ΔV_1 pour se libérer de l'attraction gravitationnelle de la Terre et s'engager sur une trajectoire elliptique dont le Soleil est un foyer et rencontrer la trajectoire de la planète Mars ;
- ΔV_2 pour ralentir le vaisseau spatial et le faire capturer par le champ gravitationnel de la planète.

La masse d'ergols en fonction de l'impulsion spécifique (Isp), pour une mission destinée à poser sur Mars une charge utile de 20 tonnes et d'une durée de 205 jours, est illustrée sur la figure 7.15.B.

Il apparaît clairement sur la figure 7.15.B que la propulsion nucléaire pour des missions habitées vers Mars est la bonne solution car les valeurs beaucoup plus élevées de l'Isp d'une propulsion nucléaire par rapport à la propulsion chimique réduisent drastiquement les besoins en carburant.

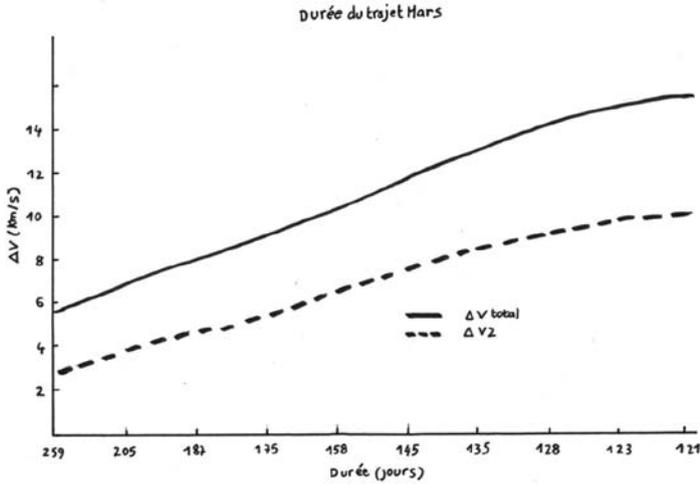


Figure 7.15.A | Variation du ΔV en fonction du temps de transfert martien.

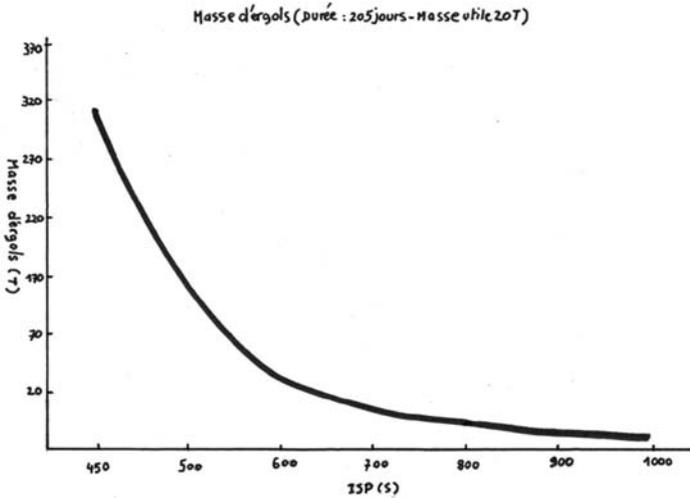


Figure 7.15.B | Courbe de variation de la masse d'ergols en fonction de l'Isp.

Pour des missions vers d'autres planètes, le tableau 7.5 indique les temps de transfert par des trajectoires de Hohmann et les ΔV correspondants pour des missions vers les planètes du système solaire.

Tableau 7.5 | Incréments de vitesse et temps de transfert pour des missions vers les planètes du système solaire.

	Mercuré	Vénus	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton
ΔV (km/s)	13,2	6,8	5,7	23,3	17,7	14,5	15,2	11,1
Durée (années)	0,3	0,4	0,7	2,7	6	16	31	45

Les mêmes considérations que celles développées sur la mission martienne conduisent à rechercher une impulsion spécifique la plus élevée possible. Il convient alors d'utiliser la propulsion nucléaire électrique (ionique ou plasmétique) (voir § « L'hydrogène et la propulsion nucléaire thermique » ci-après) qui peut donner des I_{sp} de l'ordre de 10 000 secondes. Ce type de propulseur nécessite une puissance électrique élevée inaccessible aux propulsions traditionnelles. Le recours à l'énergie nucléaire est également, dans ce cas-ci, une solution à privilégier.

L'HYDROGÈNE ET LA PROPULSION NUCLÉAIRE THERMIQUE

Les deux concepts les plus avancés en propulsion nucléaire sont :

- la propulsion nucléaire électrique (NEP) ;
- la propulsion nucléaire thermique (NTP).

La propulsion nucléaire électrique (NEP)

Ce concept ne sera pas développé dans cet ouvrage car il n'utilise pas l'hydrogène comme gaz propulsif. Il est juste décrit succinctement car il représente une solution attractive pour des missions automatiques (non habitées) et lointaines dans le système solaire.

Le réacteur à propulsion électrique est une centrale nucléaire miniature (voir fig. 7.16) et l'électricité produite est utilisée pour accélérer un gaz ionisé (par exemple le xénon) dans une tuyère par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique (propulsion plasmétique) ou plus simplement un champ électrique (propulsion ionique) (voir fig. 7.17).

Ce concept donne de très faibles valeurs de poussée (de l'ordre de 10 N), mais de très fortes valeurs d'impulsion spécifique (de l'ordre de 2 000 à 10 000 s).

Aussi le NEP n'est-il pas adapté à des vols habités vers Mars car il lui faut trop de temps pour atteindre les vitesses élevées nécessaires pour limiter la durée du transfert, mais ses très bonnes valeurs d'impulsion spécifique le rendent efficace pour des vols automatiques lointains.

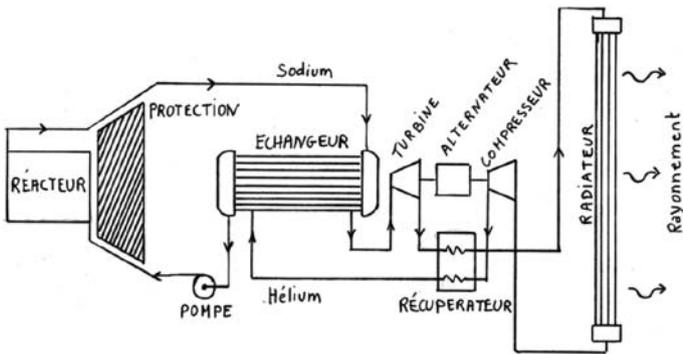


Figure 7.16 | Principe de production de l'électricité nucléaire dans le NEP.

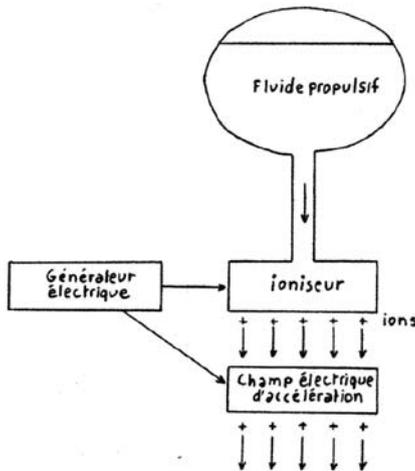


Figure 7.17 | Propulsion ionique dans le NEP.

La propulsion nucléaire thermique (NTP)

Principe de fonctionnement

De l'hydrogène liquide est stocké dans un réservoir cryogénique.

Il s'échauffe en passant à travers le cœur d'un réacteur nucléaire de très petite dimension et se transforme en un gaz qu'il suffit d'éjecter pour obtenir une forte poussée (voir fig. 7.18).

Ainsi réchauffé, l'hydrogène se transforme instantanément en un gaz de très haute température.

Plus la température du cœur est importante et plus la vitesse d'éjection est élevée.

Il est donc important d'atteindre des niveaux de chaleur extrêmes (aux limites de résistance des matériaux à la fusion) pour optimiser les performances de ce système de propulsion.

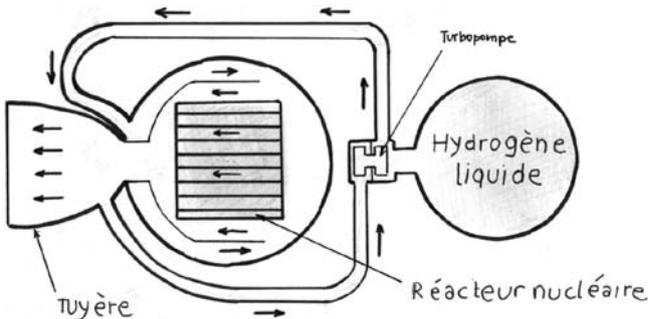


Figure 7.18 | Schéma de principe d'un réacteur nucléaire thermique (NTP).

La poussée obtenue par un tel moteur serait supérieure à celle d'un moteur chimique classique.

En outre, il consommerait deux fois moins de carburant, ce qui permettrait de réduire sensiblement la durée du voyage vers la planète Mars tout en se garantissant une réserve suffisante de carburant pour assurer l'aller-retour.

Cependant, certains combustibles nucléaires présentent des limites technologiques.

Par exemple, l'uranium 235, élément fissile des cœurs des réacteurs de type REP, ne peut monter à plus de 2 800 °C sans risquer de fondre.

De nouveaux combustibles doivent donc être développés, comme le carbure d'uranium dont la température de fusion est beaucoup plus élevée.

La température de l'hydrogène en sortie du cœur et le débit massique sont imposés par le niveau de poussée requis.

Par exemple, pour une poussée dix fois plus faible que celle du moteur Vulcain d'Ariane V, soit environ 100 kN (équivalent à une masse de 10 tonnes), il faut un réacteur de 450 MWth (à comparer aux 2 700 MWth [mégawatt thermique] d'un réacteur de puissance de 900 MWe [mégawatt électrique] du parc d'EDF) pour chauffer les 14 kg/s d'hydrogène jusqu'à 2 200 K.

Enfin, le moteur doit pouvoir démarrer et atteindre sa puissance nominale très rapidement, ce qui suppose un élément combustible capable de supporter des variations de température très importantes sur des intervalles de temps très courts.

Un héritage technologique considérable a été accumulé tout au long du programme NERVA mené aux États-Unis entre 1955 et 1973 (voir plus loin).

Il en est de même en ce qui concerne l'expérience acquise en URSS à la même époque, bien que la documentation sous-jacente restât pour une large part confidentielle.

Pendant les années 1995-1997, le CEA, en collaboration avec le CNES, prit part à la définition d'un réacteur nucléaire de propulsion spatiale (projet MAPS) pour des applications adaptées à Ariane V (voir plus loin).

Le projet NERVA

Les études de propulsion nucléaire thermique furent lancées en 1955 par l'AEC (Atomic Energy Commission) et le contractant

Westinghouse sous le nom de projet Rover, dont le but était le développement de missiles.

À sa création en 1958, la NASA fut associée au projet, en y ajoutant des objectifs d'exploration spatiale.

Dans les années soixante, la NASA misa sérieusement sur la propulsion nucléaire pour dépasser les limites des fusées à propulsion chimique.

Elle disposa alors d'une enveloppe budgétaire conséquente et rassembla sur son projet les meilleurs ingénieurs des États-Unis dans ce domaine.

Le développement se fit autour du concept de réacteur à modérateur graphite et caloporteur hydrogène.

Dans le même temps, une activité secondaire vit le jour, qui se concentra sur l'étude de techniques plus risquées mais plus performantes telles que les réacteurs à lit de boulets, à cœur liquide ou gazeux...

En 1968, un an avant le premier pas de Neil Armstrong sur le sol lunaire, la NASA pensait déjà à une généralisation des missions habitées, d'abord vers Mars, puis vers des planètes plus éloignées du système solaire.

Malgré les innombrables difficultés techniques inhérentes à un concept aussi révolutionnaire que la propulsion nucléaire spatiale, le projet avança rapidement et aboutit dès 1969 au test au sol d'un moteur quasiment qualifié pour le vol, qui dépassa en performance toutes les espérances des ingénieurs.

Malheureusement, les études sur NERVA furent stoppées net en 1973 pour des raisons purement politiques, le programme Apollo ayant atteint tous ses objectifs et la conquête spatiale ne constituant plus un sujet d'intérêt face au besoin grandissant d'investir en armement dans le cadre de la guerre froide.

Caractéristiques du fonctionnement de NERVA

Les moteurs NERVA étaient conçus pour des missions lunaires avancées ou des missions martiennes habitées, impliquant des véhicules pesant de 700 à 1 400 tonnes avec un système de propulsion de 900 kN de poussée et une impulsion spécifique supérieure à 800 secondes.

Trois options possibles étaient envisagées :

1 – Intégration dans le 3^e étage de la fusée Saturn V pour créer un lanceur superpuissant, permettant de mettre 150 tonnes sur orbite basse en un seul tir (c'est presque 10 fois les possibilités d'Ariane V).

2 – Élaboration du moteur principal d'un véhicule spatial dans une mission vers Mars, réduisant de 7 à 3 mois le temps de trajet par rapport au moteur chimique.

3 – Remorquage de charges depuis leur orbite de révolution jusqu'à la surface de la Lune pour les besoins du développement d'une base lunaire.

Caractéristique du cœur du réacteur NERVA

Conformément à la conception du NTP, la réaction nucléaire est déclenchée dans le cœur de NERVA pour chauffer de l'hydrogène liquide qui, transformé en gaz par la chaleur du réacteur, va être expulsé vers l'extérieur via une tuyère (voir fig. 7.18).

Ainsi, la fission nucléaire permet de produire une énorme quantité d'énergie à partir d'une petite quantité de matière, d'où les performances exceptionnelles.

En outre, sa poussée est modulable, en faisant rouler des cylindres, appelés « tambours » qui jouent le rôle de barres de contrôle, sur la surface extérieure de la cuve du réacteur (voir fig. 7.19).

Sur un réacteur standard de type REP, on contrôle la puissance en agissant sur des barres de contrôle constituées d'un poison neutronique appelé absorbant. Il s'agit d'un mélange de 80 % d'argent, 15 % d'indium et 5 % de cadmium (AIC) : si on veut augmenter la puissance, on monte les barres de contrôle. Si on veut la diminuer, on descend les barres.

Sur NERVA, comme le montre la figure 7.19, une partie des cylindres est occupée par du carbure de bore (B_4C) qui est un absorbant de neutrons et le reste du cylindre est occupé par de l'oxyde de béryllium qui est un réflecteur de neutrons.

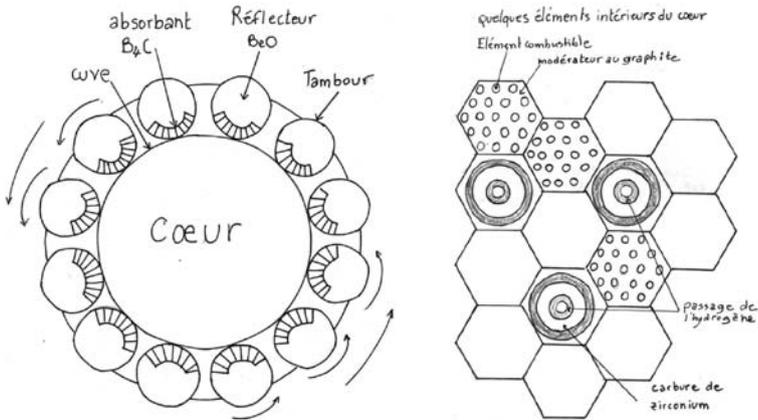


Figure 7.19 | Structure du cœur du réacteur NERVA.

Ainsi, si l'on veut augmenter la puissance, on positionne en regard du cœur la partie réfléchrice des cylindres et si on veut la diminuer, on met en regard du cœur la partie absorbante des cylindres.

Le tableau 7.6 montre qu'à pleine puissance, NERVA 2 (1991) pouvait produire une poussée de l'ordre de 330 kN (33 tonnes).

Cette poussée est insuffisante pour un premier étage de fusée, mais suffisante pour la propulsion d'un véhicule lancé depuis une orbite terrestre vers la planète Mars.

Ainsi, NERVA se situe à mi-chemin entre la propulsion chimique et la propulsion nucléaire électrique (NEP).

En effet, il possède à la fois la forte puissance du moteur chimique et la forte impulsion spécifique du moteur ionique.

Le combustible nucléaire est constitué d'un substrat de graphite, ensemencé de particules micrométriques de dioxyde d'uranium UO_2 ,

ou de perles de 100 mm de carbure d'uranium UC_2 enrobées de carbone pyrolytique.

Le choix du substrat de graphite était justifié par ses caractéristiques neutroniques et sa résistance aux hautes températures. Cependant, l'hydrogène réagit à son contact et entraîne une corrosion importante du cœur.

C'est pourquoi les orifices du cœur assurant le passage de l'hydrogène sont entourés d'un revêtement de carbure de niobium ou de zirconium (voir fig. 7.19).

Assemblage de la fusée NERVA

De nombreuses configurations de véhicules ou d'étages à base de moteur NERVA ont été proposées.

Le tableau 7.6 donne trois configurations, deux représentant l'étage supérieur de Saturn équipé d'un moteur NERVA, la troisième représentant une fusée NERVA autonome.

Tableau 7.6 | Trois configurations possibles du propulseur NERVA.

Année	1961	1969	1991
Véhicule	Saturn C-3BN	Saturn V-25	NERVA 2
Étage ment	LOx/kérosène LOx/LH ₂	LOx/kérosène LOx/LH ₂	2 boosters Titan NERVA 2/NTR

Nom moteur	Étage NERVA		
	NERVA	NERVA	NERVA NTR
Impulsion spécifique	800 s	825 s	925 s
Poussée	266 kN	889 kN	333 kN
Durée de fonctionnement	720 s	1 500 s	3 575 s
Diamètre	10,1 m	10,1 m	10,0 m
Hauteur	16,6 m	48,2 m	47,6 m
Masse initiale	32,5 t	245 t	158 t
Masse sèche	7,7 t	71 t	27 t

Le projet de la NASA et BWXT (2017)

En 2017, la NASA ressuscita le projet NERVA abandonné un demi-siècle plus tôt et signa avec Babcock & Wilcox Technologies un contrat pour la conception d'un NTP (*Nuclear Thermal Propulsion*) en support à une éventuelle mission vers Mars dans la troisième décennie du XXI^e siècle.

Les principaux avantages qui apparaissent dans le cahier des charges sont :

- Haute densité d'énergie et fortes poussées.
- Afin de résister à des températures supérieures à 2 200 °C, les éléments combustibles sont du type CERMET (composite céramique/métal) dans une gaine au tungstène.
- Alors que les projets précédents utilisaient un combustible en uranium très enrichi, le nouveau projet de la NASA fait appel à un uranium beaucoup moins enrichi (19,75 % en uranium 235).
- Un des objectifs consiste à réduire de 50 % la durée du vol vers Mars, passant de 7 mois à 3 ou 4 mois.
- Réduction du risque radiologique en réduisant drastiquement le temps de vol.
- Augmentation de la charge utile en réduisant le poids du vaisseau.

Le projet MAPS

En France, le projet du réacteur MAPS (1995-1997) est conçu autour d'éléments combustibles annulaires.

Le combustible est formé d'un lit de particules de quelques centaines de mm situées entre deux parois poreuses concentriques.

L'hydrogène, distribué à la périphérie, traverse radialement les parois de l'élément combustible et s'échauffe au contact des particules.

Ceci permet de maximiser la surface d'échange du combustible et donc de minimiser sa température afin de l'éloigner de son point de fusion.

Ces éléments combustibles sont disposés au sein d'un massif modérateur-réfecteur constitué de béryllium.

Les performances modestes de MAPS du point de vue de la propulsion (vitesse d'éjection et poussée), eu égard aux projets américains (et même russes), font apparaître cependant un fort potentiel d'innovation susceptible de trouver des applications dans la conception de nouveaux combustibles, dans l'utilisation de très hauts flux neutroniques ou encore dans la conception de réacteurs de très petites tailles.

Tableau 7.7 | Caractéristiques de MAPS.

Puissance	300 MW
Nombre d'éléments combustibles	19
Diamètre/hauteur cœur	60/70 cm
Diamètre réacteur	94 cm
Combustible (93 % U235)	UC ₂
Masse d'uranium	19,2 kg
Modérateur/réfecteur	Be
Densité de puissance cœur	1,5 kW/cm ³
Température entrée cœur H₂	150 K
Température sortie cœur H₂	2 200 K
Hauteur totale du moteur	3,85 m
Masse de l'ensemble	1 900 kg

Il est en effet à noter que, d'une manière générale, les réacteurs nucléaires utilisés pour la propulsion spatiale sont de très petites dimensions (voir tab. 7.7). Il en découle un enrichissement du combustible très élevé pour compenser l'excès de fuite de neutrons vers l'extérieur du cœur et par ailleurs, il est nécessaire d'utiliser un réflecteur très performant pour renvoyer vers l'intérieur du cœur le maximum de neutrons.

CONCLUSION DE L'HYDROGÈNE CHIMIQUE À L'HYDROGÈNE ÉNERGÉTIQUE

L'industrie utilise actuellement l'hydrogène surtout pour ses propriétés chimiques, essentiellement dans les usines de production d'ammoniac (la moitié de la consommation mondiale) et pour la désulfuration des carburants dans les raffineries.

L'hydrogène est très peu utilisé pour ses capacités énergétiques, sauf dans des applications marginales très particulières comme la propulsion des fusées.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, et sa capacité à se lier chimiquement à d'autres atomes pour donner de très nombreuses molécules (l'eau, les hydrocarbures, la matière vivante...) est telle qu'on l'observe partout tout autour de nous.

En revanche, il n'existe pas de « gisements » d'hydrogène et il faut donc le produire pour pouvoir ensuite l'utiliser.

La production mondiale d'hydrogène est évaluée en 2018 à 74 Mt, qui proviennent pour 48 % du gaz naturel, 30 % du pétrole, 18 % du charbon et 4 % de l'électrolyse de l'eau.

Le procédé spécifique le plus couramment utilisé et le plus économique à grande échelle est le vaporeformage du méthane.

En pratique, l'électrolyse de l'eau est le seul procédé de production d'hydrogène qui n'émette pas de CO₂ et par conséquent le seul procédé qui satisfasse aux exigences des politiques de lutte contre le réchauffement climatique.

En raison de son coût de production élevé et de son rendement énergétique médiocre, l'électrolyse est actuellement réservée à un marché de niche.

Cependant, grâce aux progrès de la technologie qui permettront d'améliorer les rendements et la fiabilité du procédé, l'électrolyse de l'eau, réalisée avec une électricité provenant des énergies renouvelables ou nucléaire, sera privilégiée à l'avenir pour produire un hydrogène décarboné appelé « hydrogène vert ».

Cet « hydrogène vert » contribuera à l'atteinte des objectifs que la France s'est fixés en matière de développement des énergies renouvelables et nucléaire, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de réduction de la consommation des énergies fossiles.

L'hydrogène sera valorisé dans de nombreuses utilisations :

- **Distribution de l'hydrogène**

L'hydrogène produit pourra à terme, lorsque cela sera nécessaire, être injecté dans le réseau de gaz, soit mélangé au méthane, soit à l'état pur dans des réseaux dédiés.

Des travaux pour évaluer l'impact sur la sûreté sont en cours d'étude.

- **Stockage de l'énergie**

L'hydrogène gazeux ou liquide peut être utilisé pour stabiliser le réseau électrique.

Dans un premier temps, il est produit par électrolyse avec l'électricité du réseau, puis stocké sous forme liquide ou gazeuse dans un réservoir. Dans un second temps, l'hydrogène est prélevé du réservoir pour produire, grâce à une pile à combustible, de l'électricité qui sera réinjectée dans le réseau.

Ce procédé, comparable au procédé hydroélectrique de pompage-turbinage d'une STEP (Station de transfert d'énergie par pompage), peut faciliter le déploiement des énergies renouvelables intermittentes.

• **Carburant propre pour les mobilités**

L'hydrogène contient une énergie qui peut être récupérée de deux manières distinctes :

- soit en le brûlant à la place du kérosène dans la chambre de combustion d'un réacteur d'avion ;
- soit sous forme d'électricité à partir d'une pile à combustible, afin d'alimenter un moteur électrique qui actionnera les roues d'un véhicule ou l'arbre d'une turbine.

1. Cas de l'automobile

L'objectif est la production d'électricité hybride où la pile à combustible agit comme un prolongateur d'autonomie de la batterie.

Cela résout le problème de la batterie, eu égard à son manque d'autonomie, mais aussi à son poids et son temps de recharge souvent rédhibitoire.

Cependant, la pile à combustible a des inconvénients, notamment le recours à des métaux nobles comme le platine, l'iridium ou le ruthénium, qui sont des métaux très onéreux, en tant que catalyseur au niveau des électrodes, lorsqu'on souhaite augmenter l'efficacité de la PAC aux basses températures.

Les acteurs de l'hydrogène, constructeurs et énergéticiens organisent une infrastructure globale de la filière.

Les deux constructeurs qui ont le leadership sur le marché mondial sont Toyota et Hyundai.

Côté France, en y ajoutant le savoir-faire d'Air Liquide et d'Engie pour la production d'hydrogène, la filière industrielle envisage l'installation d'un réseau ambitieux de stations-services dans un futur proche qui permettra la circulation d'un parc en croissance rapide, d'abord constitué d'utilitaires, poids lourds, cars et bus, puis progressivement de voitures particulières.

Cependant, l'hydrogène mettra du temps à détrôner la batterie pour la voiture légère grand public, principalement pour les raisons suivantes :

- du point de vue du confort, si l'on tient compte de l'encombrement engendré par les réservoirs d'hydrogène, la pile à combustible, la batterie et le moteur électrique, il ne reste plus beaucoup de place pour l'habitacle ;
- les performances techniques restent assez médiocres pour un prix très élevé ;
- la croissance du parc sera longtemps entravée par la difficulté de développer un réseau de distribution d'hydrogène dans des stations-services dédiées.

2. Cas de l'aviation

Airbus a fait de l'hydrogène l'énergie qui lui permettra de faire voler des avions sans émission de gaz à effet de serre à l'horizon 2035.

Les défis techniques et financiers sont nombreux mais pas insurmontables :

- Les réservoirs cryogéniques d'hydrogène liquide, qui occupent une place importante à l'arrière de l'avion, réduisent d'autant le nombre de sièges et par conséquent les futurs revenus des sociétés commerciales qui l'exploiteront.

En outre, ils relèvent d'une technologie innovante, bien que s'inspirant du savoir-faire de l'aérospatial.

- L'ensemble propulsif consiste à remplacer le kérosène par l'hydrogène.

En particulier, H₂ est inflammable, explosif, corrosif et volatil.

Il s'attaque aux joints et à l'étanchéité du circuit du carburant.

Une quantité importante d'études et d'essais est nécessaire pour résoudre ces problèmes élémentaires liés à la sûreté.

- La quantité d'hydrogène liquide à produire pour l'activité d'un grand aéroport comme l'aéroport CDG est considérable et des solutions de combustibles alternatifs devront cohabiter pendant encore plusieurs décennies pour satisfaire à la demande.

Ces combustibles alternatifs, en plus de l'hydrogène, sont :

- le PtL (kérosène de synthèse) ;
- le SAF (combustible à base de biomasse) ;
- les mélanges kérosène/PtL et kérosène/SAF.

3. Cas des fusées et des vaisseaux spatiaux

Les fusées

L'industrie spatiale est actuellement le plus gros consommateur mondial d'hydrogène liquide.

En particulier, les navettes spatiales américaines (1981-2011) furent propulsées par les ergols hydrogène et oxygène liquides.

Il en est de même aujourd'hui des principaux lanceurs de la planète : Saturn et SLS (États-Unis), Ariane (France), Soyouz (Russie)...

La technologie est éprouvée de longue date et le taux de réussite d'un tir est excellent. Il est par exemple pour Ariane de 96 % pour plus de 20 années de service.

Les vaisseaux spatiaux

À l'avenir, les missions spatiales proches de la Terre pour les applications commerciales (télécom, télévision, imagerie...) continueront d'être couvertes par la propulsion chimique classique des lanceurs.

Pour une mission automatique (non habitée) vers la planète Mars, où la durée du voyage n'est pas un facteur déterminant et où la charge utile est modeste, la propulsion chimique restera la meilleure option.

En revanche, pour une mission habitée, la charge utile à faire atterrir sur Mars est de l'ordre de 30, voire 40 tonnes et la durée du voyage doit être la plus courte possible.

Le déroulement d'une mission moderne consiste à déposer, au moyen d'un lanceur lourd conventionnel du type Ariane V, un vaisseau spatial sur une orbite basse. Ce vaisseau est ensuite propulsé vers une orbite martienne sur une trajectoire elliptique de transfert.

La propulsion nucléaire est alors une solution à retenir.

Le concept nucléaire le plus avancé pour remplir une telle mission est la propulsion nucléaire thermique (NTP).

Son carburant est l'hydrogène liquide mais il n'y a pas de combustion avec l'oxygène comme dans les lanceurs.

En effet, le réacteur nucléaire sert simplement à chauffer l'hydrogène dont la température passe en traversant le cœur du réacteur, de -253 °C dans le réservoir de stockage à plus de $2\,200\text{ °C}$ au niveau de la tuyère. Cela donne pour la propulsion des valeurs en poussée et impulsion spécifique très favorables, d'où des performances qui dépassent largement celles de la propulsion chimique.

Quel que soit le mode de propulsion, chimique ou nucléaire, qui sera privilégié le moment venu, le premier pas de l'Homme sur le sol martien pourra survenir entre 2035 et 2040.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue la période critique dans laquelle nous vivons aujourd'hui et ses problèmes extrêmement complexes qui s'entrechoquent : changement climatique, pandémies, instabilités géopolitiques, épuisement des réserves d'énergies...

Dans mon ouvrage *L'énergie en 2050* publié en 2006 aux Éditions EDP Sciences, j'ai écrit au début de ma conclusion :

« Quel sera l'état du monde en 2050 ?

Nous éclairerons-nous à la bougie ?

Nous déplacerons-nous à bicyclette ?

Connaîtrons-nous une intensification des catastrophes naturelles ?

Ces questions peuvent paraître en première lecture incongrues mais elles s'avèrent, à l'analyse, pertinentes et appropriées. »

Aujourd'hui, nous pouvons nous poser les mêmes questions mais personne ne pense qu'elles sont incongrues.

Ce qui est inquiétant, c'est que rien n'a été résolu depuis une vingtaine d'années, en ce qui concerne la lutte contre le réchauffement climatique et la prise en considération de l'épuisement des réserves d'hydrocarbures alors que la situation était tout aussi bien connue qu'actuellement.

En conséquence, il est fort à craindre que nous continuions de connaître une intensification des catastrophes naturelles.

Il y aura forcément un recours grandissant à la sobriété.

Concernant les mobilités terrestres, les énergies décarbonées ne pourront pas remplacer totalement les hydrocarbures et, très probablement, des voitures électriques autonomes vont rapidement faire leur apparition dans les agglomérations et remplaceront progressivement une partie du parc automobile existant.

Dans l'aéronautique, nous disposerons d'un panachage de carburants alternatifs, mais le trafic aérien diminuera en intensité.

Quant au spatial, la baisse de la richesse mondiale rendra les projets de voyages interplanétaires, habités ou non, plus problématiques.

Pour terminer sur une note optimiste, si la société arrive à surmonter la montagne de difficultés auxquelles elle est confrontée, on pourra observer que l'hydrogène est amené à jouer, dans les prochaines décennies, un rôle majeur en tant qu'énergie de propulsion des véhicules terrestres et aériens, des fusées et des vaisseaux spatiaux.

Le défi de demain sera alors de faire passer l'hydrogène du stade d'une matière première traditionnelle pour l'industrie chimique à celui d'un vecteur énergétique à la fois inépuisable et décarboné pour toutes les mobilités.

Annexes

DÉFINITIONS

ADEME. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Astromobile (rover). Véhicule conçu pour se déplacer à la surface d'autres astres que la Terre.

Atterrisseur. Engin spatial destiné à atterrir sur un corps céleste.

Big Bang. Modèle théorique standard de la cosmologie selon lequel l'Univers actuellement observable est en expansion à la suite d'une explosion originelle survenue il y a 13,7 milliards d'années.

Booster à poudre. Réservoir rempli de propergol solide servant de complément de poussée au démarrage d'une fusée.

Ceintures de Van Allen. Régions annulaires encerclant la Terre, dans lesquelles se trouvent des particules très énergétiques qui sont piégées par le champ magnétique terrestre.

Champ magnétique terrestre. Appelé aussi bouclier terrestre, c'est un champ magnétique présent dans un vaste espace autour de la Terre ainsi que dans la croûte et le manteau. Il a son origine dans des mouvements de convection du fer liquide à l'intérieur du noyau terrestre.

Charge utile. Charge correspondant à la masse maximale des éléments extérieurs à l'aéronef et à son équipage pouvant être transportés.

Déflagration. Violente explosion accompagnée d'un bruit dont la propagation est inférieure à la vitesse du son.

Détonation. Violente explosion accompagnée d'un bruit violent dont la propagation est supérieure à la vitesse du son (onde de choc).

Dose efficace. Quantité d'énergie qu'un rayonnement ionisant transmet à l'unité de masse de la substance organique ciblée. Elle prend en compte la nature du rayonnement et la nature de l'organe cible (unité : le sievert (Sv)).

Électrolyse. Généralement, décomposition de l'eau par l'électricité, qui produit de l'oxygène et de l'hydrogène. C'est le processus inverse de celui de la pile à combustible.

Ergol. Composant d'un mélange pour fournir de l'énergie.

Éruption (tempête) solaire. Événement primordial de l'activité du soleil. La variation du nombre d'éruptions solaires permet de définir un cycle solaire d'une période moyenne de 11,2 ans.

Fischer-Tropsch (procédé). Procédé chimique inventé en 1923 permettant la conversion de charbon ou de gaz en hydrocarbures liquides.

Fission nucléaire. Réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd se divise pour former deux (rarement trois) noyaux plus légers. La fission de U235 dégage 200 MeV.

Fusée. Aéronef mû par un moteur de grande puissance lui permettant de se déplacer dans l'espace.

Fusion nucléaire. Réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. La fusion du deutérium et du tritium dégage 17 MeV.

Haber-Bosch (procédé). C'est un procédé chimique permettant de synthétiser l'ammoniac par hydrogénation de l'azote atmosphérique.

Impulsion spécifique. C'est un paramètre qui mesure l'économie d'un carburant lors d'un vol. Elle se mesure en seconde.

Lanceur. Fusée chargée de placer une charge utile en orbite.

Magnétosphère. Elle englobe l'ensemble des lignes de force du champ magnétique terrestre. Elle est située au-delà de l'ionosphère à plus de 800 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre.

Noyau fissile. Noyau pouvant subir une fission provoquée par l'absorption d'un neutron lent.

Orbiteur. Partie d'un engin spatial mise en orbite autour d'un astre.

Peak oil (pic de production de pétrole) (théorie du). Théorie formalisée par le géologue King Hubbert en 1956, selon laquelle un pays a atteint le pic de production de pétrole lorsqu'il a épuisé la moitié de ses réserves.

Pile à combustible (PAC). Générateur électrochimique qui produit de l'électricité généralement par réaction de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air. Le processus inverse de la PAC est l'électrolyse.

Poussée. Selon la troisième loi de Newton d'égalité entre l'action et la réaction, en aéronautique et aérospatiale, l'action est la force d'éjection de gaz vers l'arrière à grande vitesse et la réaction se traduit par le mouvement de l'ensemble du moteur vers l'avant : c'est la force de poussée. Elle se mesure donc en newton.

Propergol. Mélange de deux substances, appelées ergols, pour fournir de l'énergie.

Radioactivité. Propriété des noyaux instables d'émettre spontanément des particules (alpha, bêta ou gamma).

Radiolyse. Décomposition de la matière par des rayonnements ionisants.

Rayonnement cosmique. Rayonnement très énergétique composé principalement de protons et de particules chargées, qui traverse l'espace et d'origine solaire (vent solaire, éruption solaire), galactique (principalement de supernova) ou extragalactique (origine inconnue).

Réacteur nucléaire. Dispositif dans lequel une réaction de fission nucléaire en chaîne peut être contrôlée.

Régolyte. Couche de poussière à la surface d'une planète sans (ou avec une faible) atmosphère ou d'un satellite.

Rover (astromobile). Véhicule conçu pour se déplacer à la surface d'astres autres que la Terre.

Sabatier (procédé). Réaction chimique permettant de produire du méthane à partir du CO_2 et de l'hydrogène.

Satellite artificiel. Engin construit par l'homme et placé en orbite autour d'un astre, en particulier de la Terre, par un lanceur.

Satellite naturel. Objet céleste en orbite autour d'une planète ou d'un autre objet naturel plus grand que lui-même.

Sonde spatiale. Véhicule spatial sans équipage lancé dans l'espace pour étudier à plus ou moins grande distance différents objets célestes.

Surgénérateur. Réacteur à neutrons rapides qui produit plus de matière fissile qu'il n'en consomme.

Tempête (éruption) solaire. Événement primordial de l'activité du soleil. La variation du nombre d'éruptions solaires permet de définir un cycle solaire d'une période moyenne de 11,2 ans.

Thermolyse. Décomposition d'un corps par la chaleur.

Turbopompe. Pompe entraînée par une turbine.

Turbopropulseur. Il fonctionne comme le turboréacteur sauf qu'il n'y a pas de tuyère et c'est l'arbre de la turbine qui actionne l'hélice.

Turboréacteur. Il se compose d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Le mélange de l'oxygène de l'air et du kérosène qui se consume dans la chambre de combustion est expulsé à grande vitesse par la tuyère. C'est l'action qui provoque la réaction (poussée). La turbine fournit l'électricité pour les besoins internes de l'aéronef.

Tuyère. Elle évacue les gaz chauds sous pression sortant de la turbine pour leur communiquer une vitesse maximale.

Voiture autonome. Voiture motorisée, capable de circuler sans l'intervention de l'homme, dans un environnement de conduite normale.

SIGLES ET ACRONYMES

AFC	Alcaline Fuel Cell
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ASPO	ASsociation pour l'étude du Peak Oil
ATAG	Air Transport Action Group
BWR	Boiling Water Reactor
CDC	Charles-De-Gaulle (aéroport)
CNG	Compressed Natural Gas
COP	COntférence des Parties
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
EAP	Etage d'Accélération à Poudre
EPC	Etage Principal Cryogénique
EPS	Etage à Propergol Stockable
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GE	General Electric
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié

HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactor
HTR	High Temperature Reactor
ISS	International Space Station
LH2	Hydrogène liquide
LNG	Liquefied Natural Gas
LOx	Oxygène liquide
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MGUNGG	Magnox Uranium Naturel Graphite Gaz
MLI	Multi-Layer Insulation
MOX	Combustible mixte UO_2/PuO_2
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEP	Nuclear Electric Propulsion
NTP	Nuclear Thermal Propulsion
NTR	Nuclear Thermal Rocket
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
PAC	Pile A Combustible
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor
PtL	Power-to-Liquid
PV	Panneau Photovoltaïque
PWR	Pressurized Water Reactor
RBMK	Reaktor Bolchoï Mochtnosti Kanalnyi
REP	Reacteur à Eau sous Pression
RHU	Radioisotope Heater Unit
RNR	Réacteur à Neutrons Rapides
RTG	Radioactive Thermoelectric Generator
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SLS	Space Launch System
SMR	Small Modular Reactor
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SPE	Solid Polymer Electrolyte

STEP	Station de Transfert d'Énergie par Pompage
TEP	Tonne Equivalent Pétrole
VHTR	Very High Temperature Reactor
VVER	Vodo Vodianyí Energetichesky Reaktor

BIBLIOGRAPHIE

- BOROWSKI S.K. & Co, Nuclear Thermal Rocket/Vehicle Design Options for future NASA Missions to the Moon and Mars, AIAA, 1993.
- CARRÉ F., Étude de comparaison de différents générateurs spatiaux, Rapport DEMA/SERMA-1056, 1989.
- CEA (Collectif), *Hydrogène, énergie de demain ?* Omniscience, 2008.
- CLARK J.S. & Co, *Nuclear Thermal Propulsion Technology*, NASA, 1991.
- Collectif. *Aviation et climat*, Isae-Supaero, Toulouse, 2022.
- IPPC (GIEC). *Climate change 2021: the physical Science Basis*. 2021.
- IPSA, cours « systèmes propulsifs », Ivry, 2019/2020.
- KANDEL R., *Le réchauffement climatique*, PUF, « Que sais-je ? », Paris, 2019.
- LUMINET J.-P., *Chroniques de l'espace*, Le Cherche Midi/France Inter, 2019.
- Manuel de pilotage d'avion, PPL et brevet de base Avion*, Maxima, Paris, 2011.
- RAEPSAET X. (CEA), *La propulsion nucléaire thermique spatiale*. Rapport scientifique (CEA/DRD), 1996.
- REUSS P., *Neutron physics*, EDP Sciences, 2008.
- WIESENFELD B., *L'énergie en 2050*, EDP Sciences, Paris, 2006.

