

## L'ÉNERGIE ET L'HYDROGÈNE

### Sommaire

1. **Introduction**
2. **L'effet de serre, l'effet de serre additionnel**
3. **La pollution atmosphérique**
4. **Du sommet de Rio au Protocole de Kyoto, à l'Accord de Paris et à la COP 27**
5. **Le rôle que peut jouer l'hydrogène**

### 1. Introduction

Depuis la nuit des temps les hommes se déplacent, mais très longtemps ils le firent avec lenteur, cette même lenteur à laquelle cheminait leur évolution. Durant des millénaires, leurs sources d'énergie n'ont pas varié : ils ont transporté, travaillé la terre et fabriqué en utilisant leur propre force, celle des animaux, celle du vent et celle de l'eau. Puis au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, tout a changé lorsque s'est développée la mise en pratique de « la puissance motrice du feu » préconisée par Sadi Carnot<sup>1</sup>. L'industrie et les transports à grande capacité et à grande vitesse, chemin de fer et bateau à vapeur, ont pris leur essor. Ils tiraient l'énergie nécessaire de la houille grâce à la vapeur d'eau qui devint le premier vecteur énergétique<sup>2</sup> de l'histoire des temps modernes.



*Sadi Carnot, physicien français du début du XIX<sup>ème</sup> siècle, fondateur de la thermodynamique, la science de l'énergie*

<sup>1</sup> Expression extraite du titre de son traité paru en 1824 : « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance* ».

<sup>2</sup> Nous entendons par vecteur énergétique un élément capable de fournir directement de l'énergie mais qui n'existe pas comme tel dans la nature. Toutefois pour la vapeur d'eau existent des exceptions dans les régions volcaniques (fumerolles en Islande, en Italie, le long de la Ceinture de feu du Pacifiques etc.).

Tout s'est encore accéléré quant à la fin de ce même XIX<sup>ème</sup> siècle sont apparus le moteur à explosion et l'électricité. Le premier était un dispositif de génie capable d'extraire de l'énergie mécanique des carburants liquides issus du pétrole présent dans la nature. La seconde, due aux propriétés des constituants de la matière, était un nouveau vecteur énergétique aux possibilités quasi infinies dont nous connaissons de nos jours, par l'électronique et ses applications, les prolongements les plus évolués et les plus prometteurs comme l'est entre autres l'actuelle révolution numérique et plus encore celle en développement de l'intelligence artificielle.

Durant le XX<sup>ème</sup> siècle, il ne fut pas une part de l'activité humaine qui n'ait pas été entièrement modifiée, voire bouleversée, par les retombées de ces deux révolutions technologiques. Le monde est alors entré dans « l'ère industrielle » assortie de la « civilisation de l'automobile » qui l'une et l'autre furent à l'origine de profondes transformations économiques et sociales. Pour alimenter le formidable développement qui s'en est suivi il a fallu - et il faut encore - de l'énergie, beaucoup d'énergie (cf. Fiches<sup>3</sup> 2.1 à 2.6), c'est pourquoi les ressources de notre planète ont été exploitées sans limite: houille, pétrole, gaz naturel, c'est-à-dire les combustibles fossiles, les ressources hydrauliques mais également l'énergie provenant de la fission de combustibles nucléaires.



*Chevalement d'un puits de mine*



*Chevalet de pompage  
d'un puits de pétrole*



*Centrale nucléaire (Tricastin)*

Aujourd'hui nous mesurons les conséquences de cette surexploitation, elles sont à la hauteur de cette démesure : épuisement des ressources fossiles, accumulation de déchets nucléaires, pollution atmosphérique menaçant la santé publique et effet de serre additionnel qui réchauffe la planète. Cette évolution du monde occidental, dévoreuse d'énergie est continue et nourrit une croissance permanente, elle-même d'autant plus sollicitée qu'il est légitime que ses bienfaits s'étendent à l'ensemble de la planète dont une grande partie bénéficie peu, voire ne bénéficie pas du tout.

Doit aussi être prise en compte dans ce bilan alarmant la très forte augmentation de la population mondiale par rapport à celle de 1970. Elle était alors de 3,7 milliards, elle est aujourd'hui de 8 milliards et pourrait être de 10 milliards à la fin de notre siècle. En prenant en compte les conséquences économiques liées à cette croissance démographique la dépense d'énergie pourrait augmenter de 50% en 2050 !

## **2. L'effet de serre, l'effet de serre additionnel**

L'effet de serre concerne la stratosphère, la couche la plus haute de l'atmosphère, celle qui nous protège des rayonnements dangereux du soleil (rayonnements ionisants et ultraviolets). Cet effet est le résultat d'un double processus radiatif. Le rayonnement lumineux à courte longueur d'onde (centré sur 0.6 micron) qui arrive du soleil sur notre planète est, pour une part, réfléchi par la haute atmosphère et les nuages, le reste traverse l'atmosphère sans y être absorbé. Arrivant sur la surface terrestre, une partie de ce rayonnement est de nouveau réfléchi vers l'espace mais l'essentiel contribue à échauffer les continents, les océans, les glaces et par suite la biosphère. La surface terrestre ainsi chauffée émet à son tour un rayonnement mais de grande longueur d'onde dans le domaine de l'infrarouge (de 4 à 80 microns, centré vers 15 microns). Ce rayonnement est en grande partie absorbé non pas par l'azote et l'oxygène de notre atmosphère, mais par les molécules de certains gaz qui y sont présents à l'état de traces : vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux, ozone troposphérique, et chlorofluorocarbones (CFC). Cette absorption d'énergie radiative est régulée par les effets de la convection et contribue à élever la température de la surface de la terre d'environ 30°C, d'où son nom

---

<sup>3</sup> Fiches de la présente rubrique « L'encyclopédie de l'hydrogène ».

d'effet de serre par comparaison avec ce qui se passe dans les serres agricoles à parois de verre qui protègent les plantes du froid. Les gaz qui en sont la cause, sont, eux, dénommés « gaz à effet de serre ».

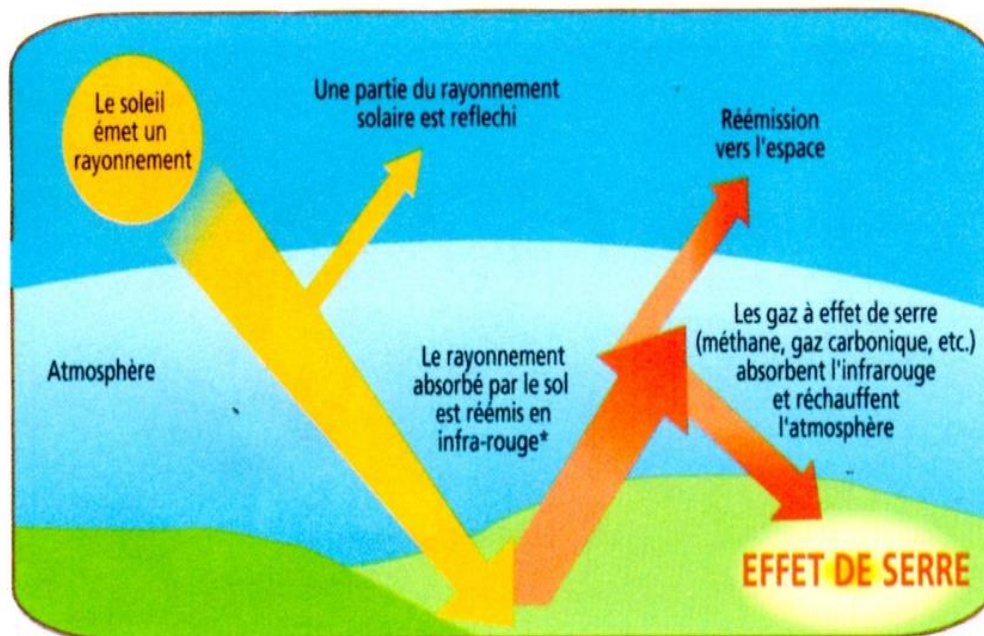


Schéma de l'effet de serre

Dans les conditions normales, cet effet de serre naturel est bénéfique car il permet à la surface de la terre d'être à une température compatible avec la vie végétale, animale et humaine. En revanche, son accroissement, dit effet de serre additionnel<sup>4</sup>, est la conséquence des activités humaines des temps modernes et surtout de la consommation excessive de combustibles fossiles<sup>5</sup>: il est la cause du réchauffement et des dérèglements climatiques constatés ces dernières décennies.

Depuis le début de l'ère industrielle, le gaz carbonique a vu sa concentration augmenter de près de 50%, elle est pour les trois quarts due à la combustion des charbons, fiouls, carburants et gaz, les combustibles d'origine fossile, et pour un quart à la déforestation. Ce gaz contribue pour plus de la moitié à l'effet de serre additionnel et ce pour une durée de séjour dans l'atmosphère d'un à deux siècles.

Le doublement de la concentration du méthane a une origine moins nette : il semble lié à l'intensification des activités agricoles. Sa part à l'accroissement de l'effet de serre est de 14%, mais pour une durée moindre car il ne subsiste qu'une dizaine d'années dans l'atmosphère.

L'oxyde nitreux, dont le taux a augmenté d'environ 10%, résulte de l'action des microorganismes dans les sols et dans l'eau. Il contribue pour 4% à l'accroissement de l'effet de serre et peut séjourner 150 ans dans l'atmosphère.

Les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrogénofluorocarbones (HCFC) n'existaient pas autrefois, ils correspondent aux fluides de réfrigération, aux agents propulsifs des bombes à aérosol, aux agents moussants etc. Contribuant à l'effet de serre additionnel et surtout destructrices de la couche d'ozone, les premières de ces substances, aujourd'hui, ne sont plus employées et les secondes ne le seront plus dans la prochaine décennie. Quant à la vapeur d'eau qui provoque l'effet de serre le plus important, elle n'est pas directement en cause dans la mesure où sa concentration ne dépend pas de nos activités ; néanmoins elle pourrait intervenir si l'échauffement global causé par l'excès des autres gaz devenait notable.

<sup>4</sup> Improprement dénommé « effet de serre », ce qui éclipse l'existence de l'effet de serre naturel.

<sup>5</sup> Improprement dénommés « énergies fossiles », en fait c'est par leur combustion qu'ils génèrent de l'énergie thermique. Le terme combustible fossile est de ce fait le plus approprié.

### **3. La pollution atmosphérique**

En plus de l'effet de serre additionnel, l'utilisation excessive de combustibles et de carburants d'origine fossile entraîne une grave pollution car ils émettent des substances chimiquement très actives aux effets néfastes sur notre environnement et surtout sur notre santé. Sont ainsi rejetés :

- De l'ozone (O<sub>3</sub>), résultat de la transformation par action du rayonnement solaire sur deux autres rejets : les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatiles (COV). Alors que dans la haute atmosphère il nous protège des rayons solaires ultraviolets, l'ozone dans la basse atmosphère est agressif pour les voies respiratoires et les yeux, il diminue le rendement des cultures et contribue au phénomène des pluies acides ;
- Des oxydes d'azote, NO<sub>x</sub>, provenant de la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air sous l'effet de hautes températures de combustion, ils sont à l'origine des pluies acides ;
- Des COV émis à la suite d'une combustion incomplète ou par évaporation lors de simples manipulations comme le remplissage d'un réservoir. En plus de la gêne olfactive ils peuvent être à l'origine de cancers, et comme il est dit plus haut, ils contribuent aussi à la formation d'ozone ;
- Des particules solides provenant surtout des moteurs Diesels. Les plus grosses se déposent sur la muqueuse de l'oropharynx et sont dégluties. Si leur quantité a notablement diminué depuis l'utilisation de filtres, les plus fines, elles, ne sont pas retenues et se déposent sur l'arbre trachéobronchique, atteignent les alvéoles pulmonaires et provoquent des inflammations et des effets allergisants voire cancérigènes ;
- Des métaux toxiques présents dans les combustibles et des hydrocarbures polycycliques, tous ont des effets cancérigènes ;
- De l'oxyde de carbone (CO), gaz non seulement très toxique, et même mortel, mais qui participe également à la formation d'ozone.

### **4. Du sommet de Rio au Protocole de Kyoto, à l'Accord de Paris et à la COP 28**

En 1992, au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, a été signée la convention sur le programme des Nations Unies concernant le changement climatique. Depuis chaque année, les pays signataires tiennent une « Conférence des Parties », COP, pour faire le point sur l'application de la convention. La première s'est tenue à Berlin en 1995.

En 1997, fut signé le « Protocole de Kyoto » engageant alors 38 pays sur des objectifs de plus en plus précis quant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Sept ans plus tard, les conditions prévues pour son application étant réunies<sup>6</sup>, le protocole a été ratifié. La date officielle de sa mise en application était le 16 février 2005 et sa date d'expiration 2012. Il concernait 162 états dont 33 des 37 pays les plus industrialisés ainsi que les grands pays émergeant comme l'Inde, la Chine et le Brésil mais à l'exception des Etats-Unis.

Après une succession de conférences aux bilans guère positifs, s'est tenu, fin 2012, la conférence de Doha au Qatar, la COP 18 qui devait prolonger le protocole de Kyoto. Ce « Kyoto II » s'est avéré lui aussi d'une faible portée pour ne pas dire qu'il n'a pas rempli son contrat d'autant qu'il fut affaibli par le retrait du Canada, du Japon et de la Russie qui en cela ont rejoint les Etats-Unis.

La COP 21, à l'automne 2015 à Paris a engagé 195 pays plus l'Union Européenne dans l'« Accord de Paris » qui demandait de « renforcer la riposte mondiale à la menace des changements climatiques dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté notamment en contenant l'élévation de la température moyenne de la planète à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels afin de réduire sensiblement les risques et les effets des changements climatiques ».

Les deux COP qui ont suivi, malgré quelques avancées (plan « neutralité carbone » et initiatives pour l'Afrique), furent plutôt en retrait. La COP 23 a même été affaiblie par le retrait des Etats-Unis de l'Accord de Paris après quoi il ne s'est trouvé aucun pays pour assurer le leadership politique de ces négociations sur le climat.

---

<sup>6</sup> Soit l'accord de 55 états qui ensemble émettent au moins 55% de la totalité des gaz à effet de serre rejetés dans le monde.



En octobre 2018, fut publié le rapport du GIEC<sup>7</sup> qui avait été demandé par l'Accord de Paris pour servir de base à la COP 24 qui allait suivre. Il soulignait que si le réchauffement climatique se poursuivait, il atteindrait 1,5 °C non pas en 2100 comme prévu à Paris mais entre 2030 et 2050 avec de graves conséquences sur la vie et les économies de la planète. Ce rapport concluait qu'il fallait de toute urgence faire « plonger » les émissions de CO<sub>2</sub>, une recommandation qui n'a pas été suivie par la COP 24.

En 2019, ce même GIEC a publié un nouveau rapport toujours sur le changement climatique et l'utilisation des sols ainsi qu'un autre rapport consacré aux océans et à la cryosphère<sup>8</sup>.

La COP qui a suivi s'est une fois de plus caractérisée par la faiblesse de son apport mais à la COP 26 le contexte était amélioré par la décision des Etats-Unis de souscrire à nouveau à l'Accord de Paris. Il y fut adopté le "Pacte de Glasgow pour le climat" permettant de finaliser les règles d'application de l'Accord de Paris même si celles-ci restaient en-deçà des ambitions initiales. Furent retenues l'importance de la biodiversité, et la diminution progressive des énergies fossiles. De plus, une centaine de pays dont la France ont décidé de réduire les émissions de méthane et d'arrêter la déforestation.

La COP 27 a maintenu l'objectif de l'Accord de Paris d'une augmentation de seulement 1,5°C de la température en 2100, en revanche, aucun moyen de tenir cet engagement n'a été mis en avant. La seule avancée notable a été la création d'un fonds spécial destiné à compenser les pertes et dommages qu'engendrent les pays riches par leurs activités. Ce fonds doit être opérationnel à la prochaine COP.

Dans son sixième rapport du printemps 2023, le GIEC estime que le réchauffement de la planète atteindra 1,5 °C dès le début des années 2030. Il recommande d'accélérer dès maintenant la baisse des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> pour les ramener à zéro le plus vite possible tout en réduisant fortement les autres émissions de gaz à effet de serre (méthane, vapeur d'eau, protoxyde d'azote, halocarbures).

De la COP 28 de l'automne 2023 qui s'est tenue à Dubaï, aux Emirats Arabes Unis, on peut retenir :

- Que la limitation du réchauffement à 1,5 °C (Accord de Paris) a été réaffirmée ;
- La sortie progressive des énergies fossiles afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. En particulier la diminution de l'utilisation du charbon ;
- Le triplement de la production des énergies renouvelables d'ici 2030 ;
- La reconnaissance de l'hydrogène bas carbone et du nucléaire comme solutions à la décarbonation ;
- L'aide aux pays les plus vulnérables aux conséquences du réchauffement climatique par l'allocation « pertes et dommages » prévue à la COP 27.



Vont-ils  
survivre ?

<sup>7</sup> Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, organisme créé en 1988 par l'ONU qui a pour mandat d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques en rapport avec le climat.

<sup>8</sup> Désigne toutes les portions de la surface des mers ou terres émergées où l'eau est présente à l'état solide.



*Les marais asséchés de Chibayich en Irak (juillet 2022)*

*Ce qu'avait déclaré en 2002 le Président Chirac au sommet de la Terre à Johannesburg : « **Notre maison brûle et nous regardons ailleurs** » est toujours vrai ou presque, disons qu'aujourd'hui : « **Notre maison brûle toujours et nous nous contentons d'y jeter quelques seaux d'eau** ».*

## **5. Le rôle que peut jouer l'hydrogène**

Comment à la fois résoudre le problème de l'épuisement des carburants fossiles, combattre l'effet de serre additionnel et diminuer la pollution ? **En agissant simultanément dans plusieurs domaines :**

- Réduire les consommations d'énergie par des actions « d'utilisation rationnelle » ;
- Améliorer les efficacités énergétiques de toutes les installations consommatrices (isolation thermique, mode de chauffage, équipements industriels, véhicules automobiles, transport maritime et aérien etc.);
- Diminuer la pollution et les rejets de gaz à effet de serre en allant à terme jusqu'à abandonner les combustibles fossiles ;
- Poursuivre l'utilisation de l'énergie nucléaire en mettant en service des réacteurs plus performants comme les EPR et les surgénérateurs à neutrons rapides en souhaitant un jour de pouvoir disposer de la fusion, dont on doit reconnaître qu'à l'heure actuelle elle est l'objet d'avancées significatives ;
- Faire appel aux énergies renouvelables : éolienne, solaire (capteurs thermiques ou photovoltaïques), marémotrice, houlomotrice, énergie extraite de la biomasse et de la géothermie ;
- **Avoir recourt à l'hydrogène.**



*Antoine de Lavoisier, chimiste français du XVIII<sup>ème</sup> siècle, mit en évidence la composition de l'eau en hydrogène et oxygène*

**L'hydrogène** est en effet un gaz non toxique et très énergétique : à masse équivalente plus de deux fois plus que l'essence et le gaz naturel et trois fois plus que le gasoil. Il est capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs par combustion directe : moteurs thermiques à pistons, turbines à gaz et moteurs fusée avec dans tous les cas comme rejet, de l'eau pure. Et dans les piles à combustible il peut produire directement de l'électricité et de la chaleur récupérable avec, là encore, comme seul résidu, de l'eau.

Jusqu'à ce jour, on a affirmé que l'hydrogène ne se trouvait dans la nature qu'à l'état combiné, essentiellement dans l'eau et les hydrocarbures. Il était donc nécessaire de le produire. En cela, comme l'électricité, il n'était pas à proprement parler une énergie mais un vecteur d'énergie. Or il n'en est rien car sous sa forme moléculaire H<sub>2</sub> il apparaît qu'il est abondant dans le milieu géologique en tous points du Globe (cf. Fiche 3.4). Il serait généré en permanence dans les couches profondes du manteau terrestre par des réactions inorganiques ce qui permettrait de le classer comme une ressource renouvelable. On le dénomme « hydrogène blanc ». Est-il exploitable ? La réponse est probablement oui car sa présence ne relève plus d'une curiosité géologique exceptionnelle mais d'une certitude. Il faut prospecter, expérimenter, en un mot, s'investir dans une véritable discipline nouvelle dont l'aboutissement pourrait donner lieu à une filière d'approvisionnement en énergie propre et renouvelable : de l'hydrogène décarboné abondant et peu coûteux. Une première étape est entre autres ce qui se passe actuellement en France, en Lorraine. En février 2022, l'hydrogène naturel a été ajouté comme ressource dans le « Code minier français » en qualité « d'hydrogène natif »<sup>9</sup>. **A suivre.**

L'hydrogène lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité provenant d'énergies renouvelables, obtenu sans empreinte carbone, l'« hydrogène vert », permet à la fois de stocker, de transporter et de réutiliser ces énergies. Il permet ainsi de les valoriser en compensant leurs principaux inconvénients d'être intermittentes, instables et non stockables.



*Eolienne*



*Panneaux photovoltaïques*



*Barrage hydroélectrique*

Adopter l'hydrogène comme vecteur d'énergie – conservons encore cette dénomination - demande de le produire, voire à l'avenir de le capter, puis de le stocker et de le distribuer et enfin d'assurer l'utilisation. Cela implique une importante mise en œuvre s'appuyant à la fois sur des technologies avancées et sur de gros investissements, le tout dans un contexte de volonté politique affirmée. A ce jour, l'objectif est d'en abaisser les coûts et d'en faciliter l'emploi tout en le faisant admettre par le grand public. C'est pourquoi aussi bien en Asie, en Amérique du Nord, et en Europe existent aujourd'hui des programmes « Hydrogène » nationaux et régionaux tout autant que des initiatives privées de petites et moyennes entreprises et de grands groupes industriels avec, dans tous les cas, des financements appropriés. Pour ce qui concerne la France, ces dernières années, ont connu un certain nombre d'initiatives en faveur de cette filière en particulier en 2020 fut adopté le « Plan hydrogène » qui devait contribuer à décarboner l'industrie et la mobilité. Un plan confirmé fin 2023 avec des options précises sur la mobilité liée aux usages, l'ouverture aux importations et l'exploration de l'hydrogène blanc.

*La soixantaine de fiches techniques qui suivent constituent la rubrique «**Encyclopédie de l'hydrogène**» du présent site. Régulièrement remises à jour, elles traitent de la manière la plus exhaustive possible ce qui concerne l'hydrogène en apportant la preuve que pour l'énergie une voie d'avenir est en train de s'ouvrir.*

<sup>9</sup> [Code minier \(nouveau\) - Légifrance \(legifrance.gouv.fr\)](https://www.legifrance.gouv.fr)