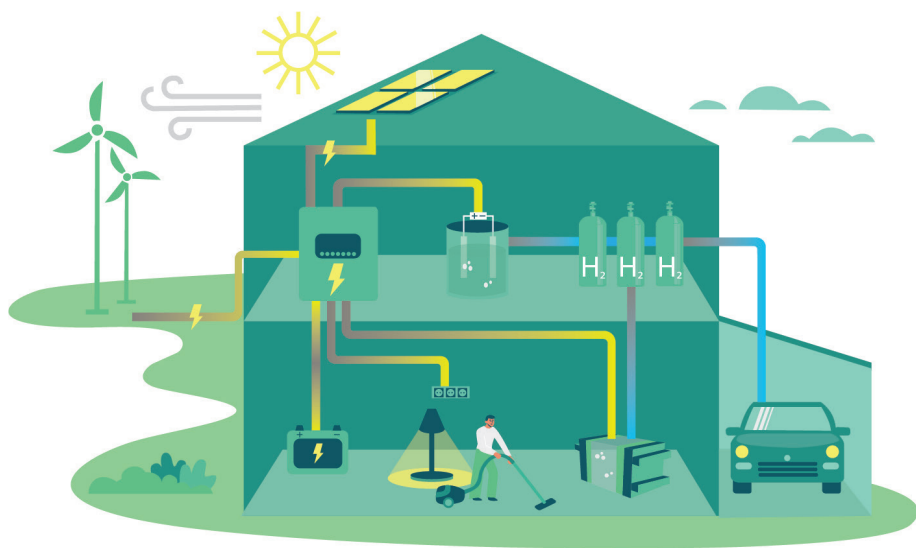


Michel Pichavant

Hydrogène et transition énergétique

Perspectives globales
et dimensions régionales



éditions
Quæ

Hydrogène et transition énergétique

Perspectives globales
et dimensions régionales

Michel Pichavant

Éditions Quæ

Pour citer cet ouvrage :

Pichavant, M., 2026. *Hydrogène et transition énergétique. Perspectives globales et dimensions régionales*, Versailles, éditions Quæ, 96 p.,
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4308-2>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici :
<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par
l'Institut des sciences de la terre d'Orléans (ISTO – UMR 7327 CNRS)
et l'Observatoire des sciences de l'univers en région Centre (OSUC – Université d'Orléans).

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles cedex
www.quae.com
www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2026
ISBN papier : 978-2-7592-4307-5
ISBN PDF : 978-2-7592-4308-2
ISBN epub : 978-2-7592-4309-9

Sommaire

Préambule	5
1. L'hydrogène est présent partout	6
L'hydrogène dans l'actualité	6
Hydrogène et politiques publiques	9
Conclusion : des points de repère nécessaires	11
2. Qu'est-ce que l'hydrogène ?	12
Un peu de chimie	12
Propriétés de l'hydrogène	13
Les différents types d'hydrogène, dénominations et définitions	14
Conclusion	15
3. La production de l'hydrogène	16
Conversion de matériaux carbonés	16
Électrolyse	19
Autres méthodes	20
La recherche sur les processus de production d'hydrogène	23
Conclusion : une production d'hydrogène appelée à évoluer	24
4. L'hydrogène naturel	25
L'hydrogène naturel existe-t-il ?	25
Les découvertes récentes d'hydrogène naturel	26
Comment l'hydrogène naturel est-il produit ?	31
L'hydrogène naturel : de l'exploration à l'exploitation	35
Conclusion : quelle place pour l'hydrogène naturel ?	43

5. Les usages de l'hydrogène	44
La consommation actuelle d'hydrogène	44
Les projections dans le futur	45
Conclusion : la consommation d'hydrogène doit aussi évoluer	48
6. La transition énergétique	49
Énergie : la situation française actuelle	49
L'ère des changements est arrivée	53
Les scénarios énergétiques du futur	54
Gestion de l'énergie à l'avenir : centralisée ou décentralisée ?	59
Conclusion	61
7. Les rôles de l'hydrogène dans la transition énergétique	62
Atouts	62
Inconvénients et limitations	66
Conclusion	68
8. L'hydrogène : un accélérateur de nouvelles pratiques en région	69
Production d'hydrogène	70
Les débouchés et applications de l'hydrogène	75
L'hydrogène naturel en Bretagne	83
Conclusion	88
Conclusion générale	90
Références bibliographiques	92
Remerciements	95

Préambule

L'hydrogène est souvent présenté comme une des principales solutions pour mettre en œuvre la transition énergétique. Son utilisation permettrait de révolutionner la production et le transport de l'énergie, comme le furent à d'autres époques l'électricité ou le gaz naturel. Ces tendances globales sont relayées par l'ensemble des acteurs économiques, médiatiques et politiques, aux niveaux régional, national, européen et au-delà. En France, l'actualité fournit de multiples exemples de mise au premier plan de l'hydrogène. En même temps, les bienfaits de cette nouvelle technologie tardent à se manifester concrètement dans le quotidien. L'hydrogène connaît actuellement un tournant, entre développement rapide et abandon à terme, et son futur n'est pas écrit.

Cet ouvrage propose une analyse synthétique de la situation présente de l'hydrogène avec une approche à deux niveaux. D'une part, le développement de l'hydrogène est soumis à des facteurs globaux de nature technologique et macroéconomique qui sont identifiés et discutés. D'autre part, c'est au niveau local que doivent être conçues, planifiées et conduites les manifestations concrètes à mettre en œuvre pour la transition énergétique. Ces deux dimensions sont traitées dans cet ouvrage, qui se veut comme un guide pratique à l'attention du grand public, des associations et des collectivités pour comprendre les enjeux généraux, qu'ils soient scientifiques, technologiques, économiques ou sociétaux, autour de l'hydrogène. Il se veut aussi un observatoire des actions et des projets en cours et un essai d'identification des filières et des opportunités de développement de l'hydrogène au niveau local. Plusieurs régions françaises se sont emparées de ce véritable produit d'appel que constituent les développements autour de l'hydrogène. Dans cet ouvrage, ces initiatives seront illustrées principalement par l'exemple de la Bretagne, considérée comme unité cohérente et représentative de la réception, de l'accueil et de l'intégration de la thématique hydrogène en région. Outre le dynamisme et la réactivité dont les régions font preuve en général sur le sujet, la Bretagne se distingue par de nouvelles formes de production et de gestion décentralisées de l'énergie, dans lesquelles l'hydrogène peut jouer un rôle important en accélérant les adaptations technologiques et sociétales nécessaires pour la transition énergétique.

1. L'hydrogène est présent partout

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme un facteur essentiel pour solutionner le problème de la transition énergétique. Comme l'ont été en leur temps l'électricité ou le gaz naturel, l'hydrogène suscite de multiples attentes, à la fois comme vecteur et comme source d'énergie. La thématique hydrogène fait l'objet d'une attention marquée dans les médias mais aussi dans le monde économique et politique, que ce soit aux niveaux régional, national, européen et au-delà. Ce chapitre reprend et illustre quelques faits marquants de l'actualité autour de l'hydrogène, sous la forme d'un florilège représentatif plutôt que d'un inventaire exhaustif. Son but est de montrer la diversité et, en même temps, la cohérence des événements actuels autour de l'hydrogène. Pour le grand public comme pour le décideur, ou pour les associations et les collectivités locales engagées dans une réflexion sur l'autonomie et la transition énergétiques, il est utile de pouvoir se repérer dans ce flux presque continu d'annonces et d'informations.

Les exemples et les illustrations de ce chapitre se situent à différents niveaux, allant du local jusqu'à l'international. Comme on va le voir, la présentation qui est faite de la thématique hydrogène est très homogène, quels que soient le niveau et le public ciblés. La tonalité est très, voire exagérément, positive et optimiste. On peut y déceler la marque d'une sensibilisation globale des opinions qui serait en cours. Au niveau local, nous avons privilégié des illustrations tirées de l'actualité en Bretagne, en tant qu'unité géographique, économique, culturelle et sociétale cohérente et représentative de la façon avec laquelle la thématique hydrogène est accueillie, ressentie et présentée dans les régions françaises. Compte tenu du nombre et de leur diversité, les illustrations ont été sélectionnées en appliquant un critère, forcément subjectif, de représentativité. Il nous a aussi semblé important d'inclure des exemples récents dans la mesure où ils s'avèrent significatifs. Le secteur de l'hydrogène se caractérise en effet par des évolutions très rapides.

L'hydrogène dans l'actualité

L'hydrogène est très présent dans l'actualité régionale bretonne, et ceci depuis plusieurs années. Le sujet est régulièrement traité dans les quotidiens régionaux comme *Ouest France* et *Le Télégramme*. Par exemple, l'inauguration de l'usine Lhyfe, qui produit de l'hydrogène en Vendée « à partir de l'eau de mer et carbure à l'électricité

fournie par les éoliennes voisines », est saluée par *Ouest France*¹. Notons que cette même entreprise a depuis lancé la construction d'une autre unité de production dans le Morbihan². Dans une autre édition, le même *Ouest France*³ écrit que « le projet de station de production d'hydrogène vert à Saint-Brieuc [Côtes-d'Armor] est plus que jamais d'actualité. Mardi soir, plus de 250 acteurs économiques et politiques étaient rassemblés à Langueux pour créer un écosystème autour du carburant de demain ». Ces articles soulignent bien l'intérêt concret de l'hydrogène pour les entreprises et le monde économique. Toutefois, d'autres en présentent des facettes un peu différentes. L'hydrogène peut en effet apparaître comme un soutien publicitaire à de grands événements sportifs et médiatiques. *Le Télégramme*⁴ écrit par exemple : « À Saint-Malo, lors de la dernière Route du Rhum, la Bretagne a déjà montré qu'elle maîtrisait l'usage de l'hydrogène. L'objectif est de décarboner les usages et de construire une filière industrielle. » Enfin, au niveau local, celui des municipalités, des associations et des communautés de communes, il est intéressant de noter que la thématique hydrogène s'est imposée comme axe de réflexion sur la production d'énergie. Ainsi, comme l'écrit le journal *Le Pover*⁵ : « Engagé dans une réflexion sur la transition énergétique, le conseil de développement du pays COB [Centre Ouest Bretagne] explore toutes les pistes qui permettraient au territoire d'assurer lui-même une production d'énergie moins impactante. La production locale d'hydrogène est un des axes de réflexion majeur de la commission. » Le pays COB n'est d'ailleurs pas la seule collectivité à s'être emparée de ce sujet (voir chapitre 8 pour des exemples de projets en cours).

En concordance avec l'affichage globalement favorable dans les quotidiens régionaux, l'hydrogène bénéficie d'un véritable traitement de faveur dans les médias d'audience nationale. Il est par exemple censé incarner le renouveau de certains secteurs industriels devenus obsolètes et représenter une opportunité pour les territoires déclassés. Dans « La fièvre de l'hydrogène vert gagne l'Espagne », *Le Monde*⁶ écrit que « l'ancienne ville minière de Puertollano, à l'immense complexe pétrochimique, entend devenir la capitale de l'hydrogène vert en Espagne ». L'hydrogène est aussi régulièrement convoqué dans l'actualité financière et boursière. Il est présenté comme « le nouvel

1. *Ouest France*, « L'usine Lhyfe, inaugurée en Vendée, produit de l'hydrogène vert, une première mondiale », F. Chrétien, 30 septembre 2021, <https://www.ouest-france.fr/environnement/ecologie/transition-ecologique/vendee-inauguration-de-lhyfe-entreprise-qui-produit-de-l-hydrogene-vert-une-premiere-mondiale-53135dfa-21dc-11ec-836f-d71c06a87745>. Tous les liens internet cités dans l'ouvrage ont été vérifiés le 13 juillet 2026.

2. *L'Usine nouvelle*, « Lhyfe va ouvrir près de Lorient une unité de production d'hydrogène vert », S. du Guerny, 16 février 2023, <https://www.usinenouvelle.com/article/lhyfe-va-ouvrir-pres-de-lorient-une-unite-de-production-d-hydrogene-vert.N2101896>

3. *Ouest France*, « Produire de l'hydrogène vert dans les Côtes-d'Armor... oui, mais pour quels usages ? », T. Grasland, 3 septembre 2021, <https://www.ouest-france.fr/bretagne/saint-brieuc-22000/produire-de-l-hydrogene-vert-dans-les-cotes-d-armor-oui-mais-pour-quels-usages-bb6512d4-oco8-11ec-9gdo-17d58ac484e5>

4. *Le Télégramme*, « Révolution de l'hydrogène : comment la Bretagne compte rester dans la course », P. Crérange, 8 décembre 2022, <https://www.letelegramme.fr/economie/revolution-de-l-hydrogene-comment-la-bretagne-compte-rester-dans-la-course-1677098.php>

5. *Le Pover*, « Penser la transition énergétique », M. Daniel, 4 novembre 2020.

6. *Le Monde*, « La fièvre de l'hydrogène vert gagne l'Espagne », S. Morel, 11 mai 2023, https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/05/10/la-fievre-de-l-hydrogene-vert-gagne-l-espagne_6172713_3234.html

eldorado des investisseurs » dans des journaux comme *Le Revenu*⁷, lequel, dans un article ultérieur, communique sur le lancement d'un fonds d'investissement dédié à l'hydrogène par de grandes entreprises comme TotalEnergies, Vinci et Air Liquide⁸.

Bien entendu, l'hydrogène en tant que nouvelle technologie fait l'objet de dossiers et d'articles scientifiques dans les revues spécialisées (par exemple *Pour la science*⁹). Toutefois, le nombre d'articles dans ces revues reste relativement limité en comparaison avec l'omniprésence de l'hydrogène dans les quotidiens et les journaux généralistes. Cette relative discrétion des revues scientifiques vis-à-vis de l'hydrogène montre que la thématique déborde largement le périmètre des publications spécialisées et est devenue un enjeu pour la presse nationale. En témoignent les présentations à tonalité sensationnaliste comme celle dans *Courrier international*, qui évoque les réserves inépuisables de la planète en hydrogène naturel : « Des milliers de milliards de tonnes d'hydrogène sous nos pieds ? »¹⁰ Dans ce contexte, les efforts d'explication scientifique dans la presse régionale font figure d'exceptions. On remarque en particulier la double page consacrée à la prospection d'hydrogène naturel en Bretagne dans *Le Télégramme*¹¹, dont la photo ci-dessous est extraite (figure 1.1), qui fait le point sur les recherches en cours et fournit en outre un dossier scientifique détaillé sur les mécanismes de production de l'hydrogène dans la croûte terrestre.

Mentionnons pour finir la place occupée par l'hydrogène dans les médias audiovisuels comme la télévision, avec un certain nombre de documentaires disponibles actuellement sur plusieurs chaînes (France 3, Arte). L'hydrogène blanc a fait l'objet d'une présentation au journal télévisé de France 2¹². L'irruption de l'hydrogène dans une émission d'information de niveau national traduit bien l'importance des attentes et des besoins d'explications que suscite la thématique auprès du grand public. Enfin, pour être complet, il est nécessaire d'indiquer l'existence de plusieurs sites web très documentés en langue française sur l'hydrogène¹³. Notons aussi les nombreux sites sur les travaux de recherche en cours autour de l'hydrogène (voir chapitre 3).

7. *Le Revenu*, « Bourse : l'hydrogène, le nouvel eldorado des investisseurs », H. Couëdic, 9 septembre 2020, <https://www.lerevenu.com/reussir-bourse/conseils-bourse/bourse-hydrogene-le-nouvel-eldorado-des-investisseurs/>.

8. *Le Revenu*, « TotalEnergies : en vert et en noir », J. Corric, 1^{er} octobre 2021, <https://www.lerevenu.com/reussir-bourse/conseils-bourse/totalenergies-en-vert-et-en-noir>.

9. *Pour la science*, « L'hydrogène au cœur de la transition énergétique », cahier spécial 485, 27 février 2018, <https://www.pourlascience.fr/p/contenus-sponsorises/l-hydrogene-au-coeur-de-la-transition-energetique-12933.php> et « Énergie : le double intérêt de "l'hydrogène orange" », S. Bailly, 24 janvier 2023, <https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/energie-le-double-interet-de-l-hydrogene-orange-24546.php>.

10. *Courrier international*, « Des milliers de milliards de tonnes d'hydrogène sous nos pieds ? », 16 décembre 2024, https://www.courrierinternational.com/article/recherche-des-milliers-de-milliards-de-tonnes-d-hydrogene-sous-nos-pieds_226012.

11. *Le Télégramme*, « Hydrogène blanc : nouvel or noir pour la Bretagne ? », F. Jacq, 7 septembre 2023, <https://www.letelegramme.fr/bretagne/hydrogene-blanc-un-nouvel-or-noir-dans-les-sols-bretons-6422808.php>.

12. France 2, *Journal de 20 h* du 5 décembre 2023.

13. Par exemple celui de France Hydrogène (<https://www.france-hydrogene.org>) ou du CEA (<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx>).

Figure 1.1. Prospection de l'hydrogène naturel en Bretagne.



Source : © C. Rigollet¹⁴.

Hydrogène et politiques publiques

L'hydrogène fait l'objet d'une attention marquée de la part du monde politique, et ceci à tous les niveaux, régional, national et européen. Ainsi, au niveau régional, pratiquement toutes les régions françaises se sont emparées de ce véritable produit d'appel que constituent les développements autour de l'hydrogène. Le salon Hyvolution¹⁵ rassemble sur une base annuelle les acteurs des différentes régions françaises sur la thématique et permet une présentation des projets et de leur avancement. L'installation d'un réseau de stations fournisseuses d'hydrogène en Occitanie, la construction d'électrolyseurs de grande capacité en Normandie sont quelques exemples des actions soutenues par les régions et sur lesquelles le lecteur intéressé pourra se documenter.

14. *Le Télégramme*, « Hydrogène blanc : nouvel or noir pour la Bretagne ? », F. Jacq, 7 septembre 2023.

15. <https://paris.hyvolution.com/fr>

En ce qui concerne la Bretagne, une feuille de route du déploiement de l'hydrogène renouvelable a été adoptée par le conseil régional (session du 10 juillet 2020). Sa mise à jour en 2024 prévoyait le développement de trois axes¹⁶. Le premier avait pour ambition de déployer les technologies et les services hydrogène afin d'optimiser les systèmes énergétiques et de décarboner les secteurs du transport, de l'énergie et de l'industrie, et ainsi amorcer le développement d'un premier maillage d'infrastructures de production et de distribution d'hydrogène issu de ressources renouvelables (solaire, éolien). Le second visait à développer des activités de recherche spécifiques autour de l'hydrogène *offshore*, autour de la production d'hydrogène à partir d'énergies marines ou des filières agricoles ou agroalimentaires et autour d'aspects moins matures des technologies de l'hydrogène comme l'hydrogène naturel. Enfin, dans le troisième axe, la région avait pour objectif de lancer un plan structurant d'équipements collectifs pour l'ensemble des filières et de l'écosystème autour de l'hydrogène, avec notamment la conversion des flottes maritimes. Ces différents axes seront repris ultérieurement dans cet ouvrage (voir chapitre 8), mais on peut voir dans la position des instances régionales, comme dans la tenue d'événements tels que les BrittanHy Days (22 septembre 2023) ou les Journées hydrogène bretonnes (29 mai 2024), le signe du dynamisme régional et de la mobilisation des acteurs de l'hydrogène et, aussi, de la rapidité avec laquelle la Bretagne réagit aux enjeux et aux opportunités du secteur.

L'objet de ce chapitre n'est pas de présenter en détail les politiques concernant l'hydrogène au niveau national et européen. Le lecteur intéressé pourra consulter avec profit les sites web appropriés, que ce soit à l'échelle nationale¹⁷ (actualisés récemment¹⁸) ou européenne¹⁹. Il est désormais devenu clair que c'est à un niveau plus local que doivent être planifiées et conduites les manifestations concrètes à mettre en œuvre dans le cadre de la transition énergétique. Néanmoins, les politiques nationales et européennes ont le mérite de susciter un effet d'entraînement bien réel et qui doit être reconnu. Dans ce contexte, l'intérêt marqué du monde politique vis-à-vis de l'hydrogène est un facteur très positif, même si les engagements peuvent paraître opportunistes et de nature superficielle. On peut ainsi noter ces dernières années plusieurs interventions de la présidence de la République (annonces d'un plan à 7 milliards d'euros pour l'hydrogène²⁰, et de la mise en place de financements massifs pour explorer l'hydrogène blanc²¹). En ce qui concerne la réglementation, la recherche d'hydrogène naturel bénéficie depuis récemment (3 décembre 2023) d'un encadrement

16. <https://www.bretagne.bzh/aides/fiches/hydrogene-renouvelable-maillage-des-territoires-bretons/>, <https://www.bdi.fr/fr/projets/hydrogene-renouvelable/>

17. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/lhydrogene-ses-avantages>

18. <https://www.info.gouv.fr/actualite/actualisation-de-la-strategie-nationale-hydrogene>

19. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

20. *Les Échos*, « Hydrogène : la France détaille son plan à 7 milliards d'euros », A. Feitz, 8 septembre 2020, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/hydrogene-la-france-detaille-a-son-plan-a-7-milliards-deuros-1240547>

21. <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2023/12/11/point-detatpe-du-plan-france-2030-depuis-toulouse>

administratif ouvrant la voie à son autorisation (Légifrance, 2023). Un premier permis a été attribué à une zone de 225 km² dans les Pyrénées-Atlantiques, et plusieurs autres demandes pour des projets similaires sont à l'étude. Enfin, au niveau international, la Commission européenne a adopté en 2020 un plan stratégique de soutien à l'hydrogène, et des conventions sur l'hydrogène sont régulièrement organisées, la 8^e ayant eu lieu en février 2025.

Conclusion : des points de repère nécessaires

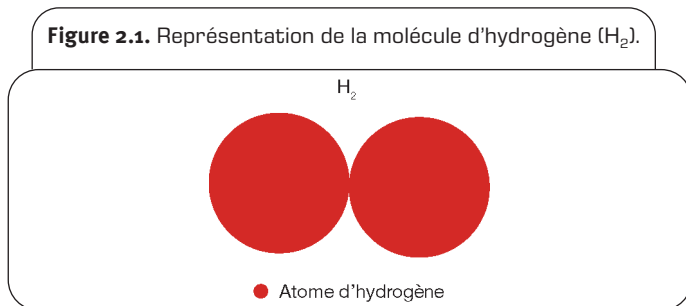
Comme nous l'avons vu, l'hydrogène est un sujet abondamment évoqué dans les médias. Au niveau régional, l'hydrogène est très présent dans la presse et dans l'actualité économique ; c'est un sujet dont les entreprises et les collectivités se sont emparées. Étant considéré comme très prometteur économiquement, l'hydrogène fait l'objet d'une attention particulière du monde politique. Cet état de fait privilégié peut s'expliquer par un sentiment d'urgence vis-à-vis de la situation climatique et par les fortes attentes suscitées par l'hydrogène pour résoudre les défis associés à la demande et à la transition énergétique. La multiplication des annonces de nature économique et politique contraste avec la relative discrétion du monde scientifique, qui n'est pas encore parvenu à débloquent certains verrous qui limitent la pleine utilisation de l'hydrogène, ce que nous verrons par la suite. On doit malheureusement reconnaître que l'hydrogène est aussi utilisé comme un produit d'appel, que ce soit pour faire la publicité de voitures propres (par exemple chez Hyundai) ou pour attirer les investissements (par exemple chez Air Liquide). Le citoyen peut éprouver un certain sentiment de confusion devant ce qui ressemble à un emballement autour de l'hydrogène. Il est donc important que soient fournis des points de repère et des outils pour informer l'opinion, ouvrir la voie à la décision et, éventuellement, stimuler l'utilisation concrète des technologies basées sur l'hydrogène. C'est l'objet des chapitres suivants de cet ouvrage.

2. Qu'est-ce que l'hydrogène ?

On pourrait commencer ce chapitre en reprenant le titre du chapitre 1, car l'hydrogène est vraiment présent partout dans l'univers. C'est en effet l'élément chimique le plus abondant des étoiles et du milieu interstellaire. On estime que, dans notre galaxie, l'hydrogène a une concentration de 75 % en masse (hors matière noire²²). L'hydrogène est également à l'origine de tous les autres éléments chimiques. Plus près de nous, on sait que la Terre est entourée d'un halo d'hydrogène qui s'étend dans l'espace jusqu'à plus de 20 000 km de distance. La présence d'hydrogène dans les profondeurs de la Terre est également un fait avéré, même si cet hydrogène n'est que rarement mobilisable et utilisable en tant que tel, car fortement lié chimiquement avec d'autres éléments, en particulier l'oxygène (voir ci-dessous et chapitre 4).

Un peu de chimie

L'hydrogène (symbole chimique H) est le plus simple de tous les atomes. Il est composé d'un seul électron et d'un seul proton. Par « hydrogène », on parle en fait de la molécule H_2 (composée de 2 atomes d'H, figure 2.1). L' H_2 est surtout présent sous forme gazeuse, mais il peut aussi être utilisé sous forme liquide, ce qui induit un gain de volume important, l' H_2 liquide étant beaucoup plus dense que l' H_2 gazeux. Cependant, pour être obtenu, l' H_2 liquide demande que l' H_2 soit comprimé ou refroidi, deux opérations qui ont chacune un coût.

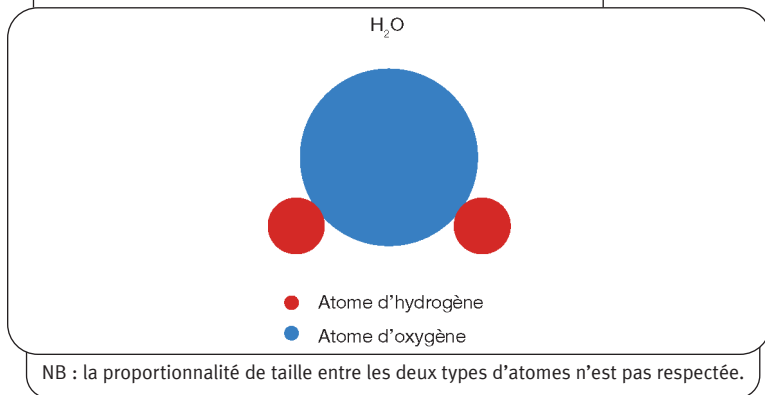


Comme la molécule d'eau (H_2O), la molécule d'hydrogène (H_2) comporte deux atomes d'H, et les deux ne diffèrent entre elles que par la présence d'un atome d'oxygène (O) dans la formule chimique (figure 2.2). Toutefois, les propriétés chimiques des deux

22. https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements

molécules sont fortement contrastées. Leur comportement est très différent, et le « passage » d'une molécule à l'autre — soit par addition d'un atome d'oxygène à la molécule H_2 , soit par soustraction de ce même atome d'oxygène à la molécule H_2O — est très difficile, nécessitant une grande quantité d'énergie (voir chapitre 3, section « Électrolyse »).

Figure 2.2. Représentation de la molécule d'eau (H_2O).



Propriétés de l'hydrogène

Les principales propriétés de l'hydrogène (H_2) tirées de la littérature²³ sont rassemblées dans le tableau 2.1. Sous sa forme gazeuse, il est beaucoup plus léger que l'air, ce qui lui permet de diffuser rapidement, et donc d'être dissipé dans l'atmosphère, minimisant ainsi les risques d'inflammation ou d'explosion. Par contre, sa faible densité pose des problèmes dans le transport, des réservoirs avec des volumes importants étant nécessaires pour son acheminement sous forme gazeuse. Sous forme liquide, l'hydrogène est beaucoup plus dense et donc plus facilement transportable. L'hydrogène est inodore, sa flamme est incolore, sa combustion indétectable visuellement, et ce n'est pas un produit toxique. Le pouvoir calorifique (quantité d'énergie thermique libérée par combustion) de l'hydrogène est le plus élevé de tous les combustibles. Par exemple, le pouvoir calorifique d'un kilogramme d'hydrogène est plus de deux fois supérieur à celui d'un kilogramme de gaz naturel ou de gazole. L'hydrogène peut s'enflammer/exploser dans l'air à partir d'une concentration de 4 % en volume, légèrement inférieure à celle du gaz naturel (5 % en volume). Toutefois, la grande volatilité de l'hydrogène en milieu ouvert (l'atmosphère) rend en pratique ce seuil difficile à atteindre. Pour l'hydrogène, les limites d'inflammabilité et d'explosivité sont confondues.

23. <https://www.france-hydrogene.org>

Tableau 2.1. Quelques propriétés de la molécule d'hydrogène (H₂).

Propriété	Valeur numérique	Commentaire
Combustible	-	Seul combustible non carboné
Odeur	-	Inodore
Flamme	-	Incolore
Toxicité	-	Non toxique
Pouvoir calorifique H ₂	119,9 MJ/kg	Pouvoir calorifique le plus élevé de tous les combustibles
Pouvoir calorifique (gaz naturel)	50,0 MJ/kg	-
Pouvoir calorifique (gazole)	43,0 MJ/kg	-
Densité de l'H ₂ gaz (à 25 °C)	0,0948 kg/m ³	Gaz extrêmement léger
Densité de l'air (à 25 °C)	1,204 kg/m ³	-
Densité du gaz naturel (25 °C)	0,687 kg/m ³	-
Densité de l'H ₂ liquide (à - 253 °C)	70,79 kg/m ³	-
Température auto-inflammation dans l'air	585 °C	-
Limite d'inflammabilité dans l'air	4 vol%	Valeur minimale

Les différents types d'hydrogène, dénominations et définitions

L'hydrogène (H₂) apparaît sous différentes dénominations dans les médias. On parle d'hydrogène « vert », « blanc », etc.²⁴ Pour le grand public, ces différentes appellations entretiennent une certaine confusion. Cependant, chacune bénéficie d'une définition précise que le lecteur doit garder à l'esprit. De plus, et ce point est particulièrement important, ces définitions renvoient à l'origine de l'hydrogène et à son mode de production. Ce sont donc des définitions génériques qu'il est important de maîtriser. Comme on le verra dans la suite de cet ouvrage, les questions autour de l'origine de l'hydrogène et de son mode de production sont en effet cruciales. Le tableau 2.2 résume les principales dénominations de l'hydrogène et en donne les définitions. Deux grands types d'hydrogène apparaissent. Les principaux, l'hydrogène gris et l'hydrogène vert, regroupent la grande majorité de l'hydrogène produit et consommé aujourd'hui. Ils sont tous deux d'origine artificielle, la distinction s'opérant sur deux critères : la nature des matériaux sources (carbonés ou non carbonés) et le caractère émetteur ou non de dioxyde

24. D'autres dénominations existent, comme celle impulsée par l'Ademe : <https://www.culture.fr/franceterme/En-francais-dans-le-texte/Hydrogene-des-termes-aujourd-hui-pour-dire-l-energie-de-demain>

de carbone (CO₂) du procédé d'obtention. L'hydrogène blanc (d'origine naturelle) est à rattacher à ces deux premiers au vu de son importance, toutefois actuellement plus potentielle que réelle (voir chapitre 4). Parmi les types secondaires figure l'hydrogène bleu. C'est une variante de l'hydrogène gris, duquel il diffère seulement par une association avec des technologies de séquestration du CO₂, ce qui permet de minimiser l'impact environnemental de sa production (voir chapitres 3 et 6). L'hydrogène orange, une dénomination récemment introduite (Osselin *et al.*, 2022), est obtenu artificiellement à partir de réactions couplées d'hydrogénation et de carbonatation induites dans des milieux naturels favorables. Il s'inspire des processus responsables de la production de l'hydrogène blanc (hydrogène naturel), dont il est proche. À noter que la production d'hydrogène orange contribue à séquestrer le CO₂ sous forme de minéraux carbonatés.

Tableau 2.2. Les différents types d'hydrogène, dénominations et définitions.

Type d'hydrogène	Origine/mode de production
<i>Types principaux</i>	
Gris	Produit artificiellement à partir de matériaux carbonés et de processus émetteurs de CO ₂
Vert	Produit artificiellement à partir de matériaux décarbonés et de processus non émetteurs de CO ₂
Blanc	Produit naturellement
<i>Types secondaires</i>	
Bleu	Produit artificiellement à partir de matériaux carbonés et de processus émetteurs de CO ₂ ; leur impact environnemental est réduit par l'introduction de technologies de séquestration du CO ₂
Orange	Produit artificiellement par des réactions couplées d'hydrogénation et de carbonatation induites dans le milieu naturel ; séquestre le CO ₂

Conclusion

Ce chapitre a permis de préciser la nature de l'hydrogène et d'en souligner les propriétés remarquables. Il en montre aussi toute la diversité, à rebours de la présentation globale dont il est généralement l'objet. L'appellation « hydrogène » recouvre en fait différentes réalités. L'hydrogène blanc est bien différent du gris ou du vert, par son origine, son mode de production ou l'empreinte environnementale qui y est associée (émissions de CO₂). Apparaît ainsi pour la première fois dans ce chapitre un point d'importance cruciale : la relation entre la production de l'hydrogène et les enjeux environnementaux, les technologies d'obtention de l'hydrogène étant très inégales du point de vue des émissions de CO₂. Ce point sera réexaminé plus en détail dans les chapitres 3 et 6.

3. La production de l'hydrogène

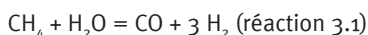
La diversité des types d'hydrogène est la conséquence directe de matériaux sources différents et de modes de production variés. Pour l'hydrogène plus que pour d'autres énergies comme l'électricité, il importe, avant toute utilisation, de se poser la question de sa provenance. Pour y répondre, une connaissance des différents procédés de production d'H₂ actuellement opérationnels est nécessaire. C'est l'objet de ce chapitre que de les présenter.

Conversion de matériaux carbonés

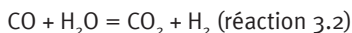
L'hydrogène est synthétisé artificiellement à partir d'une large gamme de matériaux carbonés fossiles (hydrocarbures, gaz naturel, charbon). Différents procédés existent en fonction de la matière première source, de la méthode utilisée et des contraintes industrielles. On peut les regrouper en deux grands types : le vaporeformage et l'oxydation partielle. Nous en donnons ci-dessous un descriptif simplifié. Le lecteur intéressé par plus de détails pourra se reporter à une fiche spécialisée (France Hydrogène, 2019a).

Vaporeformage

Ce procédé utilise principalement le gaz naturel comme source d'hydrogène (figure 3.1). Ce dernier contenant essentiellement du méthane (CH₄), le procédé consiste à faire réagir ce dernier avec l'eau (H₂O) à haute température (800-900 °C) et moyenne pression (20-30 bars) selon la réaction :



laquelle, pour être opérationnelle, nécessite un apport de chaleur et l'action d'un catalyseur. Cette réaction s'accompagne de différentes opérations complémentaires qui optimisent la production d'hydrogène, et au cours desquelles des sous-produits comme les carburants de synthèse sont obtenus. Parmi ces dernières opérations, la réaction suivante :

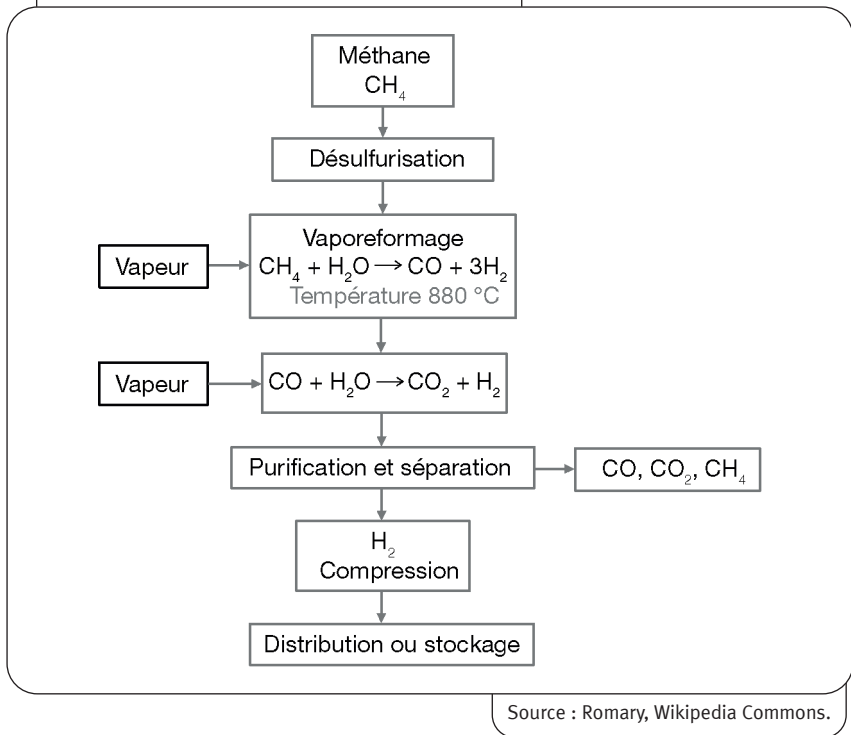


permet l'élimination du CO par conversion en CO₂ et l'augmentation de la proportion d'H₂ dans le produit final (appelé « gaz de synthèse »). Ce dernier contient encore environ 20 % de CO₂, et il doit être purifié afin d'isoler l'H₂. Cette étape est réalisée principalement par adsorption sélective des impuretés (CO, CO₂, CH₄ encore présents dans le gaz de synthèse) sur un tamis moléculaire. Le gaz ainsi obtenu est de l'hydrogène quasiment pur (99,9 % d'H₂).

Cette technologie permet de traiter tous les hydrocarbures « légers » (c'est-à-dire dont les constituants contiennent des hydrocarbures à petit nombre d'atomes de carbone),

soit, en dehors du gaz naturel et du méthane, du GPL (gaz de pétrole liquéfié, mélange d'hydrocarbures légers) et du naphta (produit dérivé de la distillation du pétrole). La production d'hydrogène par vaporeformage est généralement couplée avec d'autres procédés industriels qui permettent de valoriser au mieux les investissements. Parmi ces derniers, l'ammoniac (actuellement une des utilisations majeures de l'hydrogène au niveau mondial, voir chapitre 5) peut être obtenu simplement à partir du gaz de synthèse par reformage secondaire à l'air. Cette opération permet l'oxydation du CO en CO₂ et fournit l'azote (N) nécessaire pour la synthèse de la molécule d'ammoniac (NH₃).

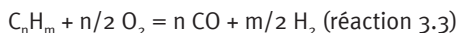
Figure 3.1. Schéma des étapes réactionnelles dans le vaporeformage du méthane.



■ Oxydation partielle

Ce procédé utilise comme produits de départ des matériaux carbonés « lourds » (dont les constituants contiennent des hydrocarbures à grand nombre d'atomes de carbone, n, et à grand nombre d'atomes d'hydrogène, m) allant jusqu'aux charbons et

à la biomasse. La méthode consiste à oxyder partiellement les matériaux carbonés à haute température (900-1 500 °C) et moyenne pression (20-60 bar) en présence d'oxygène et d'eau. On obtient un gaz de synthèse à partir de la réaction :



qui peut être couplée avec la réaction 3.2 de conversion du CO. Ces deux réactions peuvent être suivies par des étapes d'élimination du CO₂ et de purification qui permettent d'obtenir un gaz à 99,9 % d'H₂.

■ L'hydrogène produit aujourd'hui est principalement gris

Des procédés de production d'hydrogène intermédiaires entre le vaporeformage et l'oxydation partielle existent. Ces deux méthodes présentent donc une grande similarité. Par ailleurs, l'oxydation partielle de gaz naturel peut servir dans le cadre d'applications spécifiques. Pour être complet sur la production à partir des combustibles fossiles, il faut aussi mentionner quelques autres procédés d'importance moindre qui seront évoqués plus loin dans ce chapitre.

Vaporeformage et oxydation partielle consomment de l'eau et de l'oxygène, demandent de l'énergie et émettent du CO₂. Ces caractéristiques permettent de définir l'hydrogène ainsi formé comme de l'hydrogène gris. La production d'hydrogène par ces méthodes fait partie des technologies de traitement des combustibles fossiles. L'hydrogène est synthétisé artificiellement dans des complexes pétrochimiques gérés par les grands groupes pétroliers (TotalEnergies, Shell, Texaco, etc.). Une part significative de l'hydrogène produit est d'ailleurs utilisée directement pour les besoins du raffinage pétrolier (voir chapitre 5). Notons que la forte empreinte environnementale associée à ces procédés (puisque les deux produisent du CO₂) peut être réduite en leur associant des technologies de séquestration du CO₂. C'est l'origine de l'hydrogène bleu. Toutefois, la viabilité technique et économique de ces technologies (principalement le stockage souterrain) n'est pas encore vraiment démontrée à l'heure actuelle. Ce mode de production d'hydrogène doit donc être encore considéré comme une possibilité intéressante, mais qui ne s'est pas encore imposée au stade industriel.

Aujourd'hui, le vaporeformage et l'oxydation partielle sont les deux principaux procédés d'obtention de l'hydrogène. Environ 95 % de l'hydrogène produit au niveau mondial provient de combustibles fossiles. La grande majorité de l'hydrogène utilisé est donc de l'hydrogène gris.

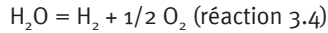
En ce qui concerne les coûts de production, les technologies d'oxydation partielle entraînent en général un surcoût par rapport au vaporeformage, ce qui peut éventuellement être compensé par un prix avantageux de la matière première (charbon ou biomasse pour l'oxydation partielle, contre gaz naturel pour le vaporeformage). De même, l'introduction de méthodes de séquestration du CO₂ renchérit le coût de production d'H₂. L'hydrogène bleu sera donc en général plus

cher que l'hydrogène gris. Pour une comparaison détaillée des coûts de production des différents types d'hydrogène, le lecteur se reportera au chapitre 7, section « Inconvénients et limitations ».

Électrolyse

■ Principe

L'électrolyse est le mécanisme qui permet la décomposition de la molécule d'eau (H_2O) sous l'action d'une énergie électrique. Cette décomposition est décrite par la réaction :

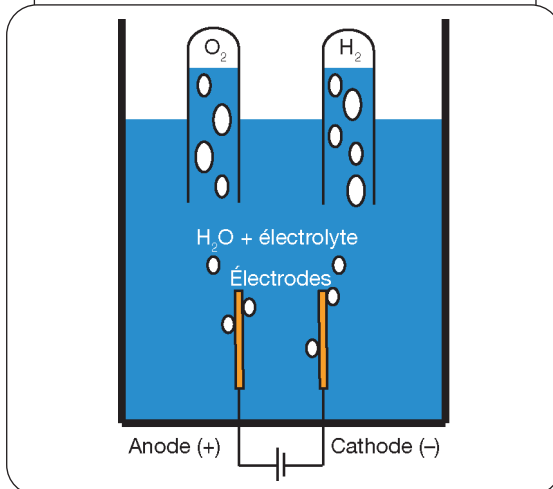


qui est la représentation chimique d'un processus global résumé par :



Le schéma de principe d'un électrolyseur est fourni dans la figure 3.2. Il comprend deux électrodes (anode et cathode), généralement en graphite ou en métal chimiquement inerte et électriquement conducteur, reliées à un générateur de courant électrique continu. Elles sont insérées séparément dans un électrolyte (milieu conducteur) qui peut être soit une solution aqueuse (cas de la figure 3.2), soit une membrane polymère échangeuse de protons, soit une membrane céramique conductrice d'ions O^{2-} . La réaction produit de l' H_2 et de l' O_2 (dioxygène) gazeux qui sont récupérés.

Figure 3.2. Schéma de principe de l'électrolyse.



Autour de ce principe de base, les électrolyseurs peuvent varier de façon importante selon le type de structure (monopolaire ou bipolaire) et la nature de l'électrolyte (alcalin, échangeur de protons ou solide). Le lecteur intéressé pourra consulter la fiche spécialisée de France Hydrogène (2023) pour plus de détails.

I Électrolyse et hydrogène vert

À la différence du vaporeformage et de l'oxydation partielle, qui partent de matériaux carbonés, l'électrolyse utilise de l'eau comme matière première. Elle consomme de l'énergie sous forme électrique. Toutefois, contrairement au vaporeformage et à l'oxydation partielle, l'électrolyse ne rejette ni CO_2 ni aucune autre espèce carbonée. Dans le cas où l'énergie électrique nécessaire est d'origine solaire ou éolienne (et donc issue de processus non émetteurs de CO_2), l'hydrogène produit par électrolyse représente l'archétype de l'hydrogène vert. Toutefois, si l'électricité provient de combustibles fossiles, l'appellation « hydrogène vert » est clairement abusive, car la consommation de ce type d'électricité pour l'électrolyse participe alors à l'émission de CO_2 . Tout hydrogène produit par électrolyse n'est donc pas nécessairement vert. Si l'électricité est d'origine nucléaire (cas important en France, voir chapitre 6), l'hydrogène produit est « par définition » de l'hydrogène vert, puisque la réglementation européenne considère désormais le nucléaire comme une énergie non émettrice de CO_2 (SGAE, 2024).

Bien qu'encore très minoritaire (5 % de l' H_2 au niveau mondial), l'électrolyse est une des principales voies de production d'hydrogène. Elle suscite toutefois de très importants efforts de recherche et de développement (voir section « La recherche sur les processus de production d'hydrogène » dans ce chapitre). Cette filière bénéficie d'investissements industriels lourds, par exemple l'installation d'électrolyseurs de grande capacité par Air Liquide en Normandie²⁵. Actuellement, l'électrolyse s'impose comme la principale alternative aux hydrocarbures pour produire de l' H_2 . Son développement reste cependant très lié à des facteurs macroéconomiques, comme le coût de l'électricité. L'électrolyse reste en effet beaucoup plus coûteuse que la production d' H_2 à partir des combustibles fossiles (la différence est d'environ un facteur $\times 4$, chapitre 7, section « Inconvénients et limitations »). L'avènement de l'électrolyse comme méthode de production d' H_2 nécessiterait des investissements dans les technologies énergétiques vertes (solaire, éolien) pour produire une électricité à moindre coût.

Autres méthodes

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous en détaillons un certain nombre ci-dessous.

25. <https://normandhy.airliquide.com/>

■ Dissociation thermique de l'eau

La grande stabilité de la molécule d'eau (H_2O) nécessite des quantités d'énergie importantes pour la dissocier en hydrogène et en oxygène. Cette dissociation (nommée « thermolyse ») ne se produit qu'à des températures supérieures à 2 500 °C. Ces conditions opératoires sont difficiles à obtenir et à contrôler, et la thermolyse n'est pas une méthode retenue pour l'obtention d' H_2 . Des solutions moins coûteuses en énergie existent néanmoins. Elles sont basées sur des cycles thermochimiques qui impliquent l'addition de composés chimiques autres que l'eau et nécessitent des fours solaires ou des réacteurs nucléaires pour atteindre les températures requises. Ces procédés ne sont pas encore parvenus au stade industriel.

■ Dissociation de l'eau par photo-électrolyse

Le principe est le même que pour la thermolyse, à la différence qu'ici c'est l'énergie solaire sous la forme de photons qui induit la dissociation de la molécule d'eau. Sa mise en œuvre s'opère par éclairage d'un photocatalyseur à semi-conducteur immergé dans de l'eau ou dans un électrolyte aqueux. Différents types et configurations de semi-conducteurs ont été essayés depuis une vingtaine d'années, avec une augmentation générale des rendements. Toutefois, cette technologie est encore éloignée du domaine des applications.

■ Production d'hydrogène à partir de la biomasse

La biomasse est l'ensemble des matières organiques d'origine biologique pouvant devenir des sources d'énergie. Le carbone et l'hydrogène en sont les éléments constitutifs de base, et la biomasse, comme les autres matériaux hydrocarbonés, représente une source potentielle d' H_2 . Toutefois, ses caractéristiques propres doivent être prises en compte, et les procédés de traitement de la biomasse diffèrent de ceux mis en œuvre pour les combustibles fossiles. Ils sont principalement au nombre de deux : méthanisation-reformage et transformation thermochimique.

Méthanisation-reformage

La méthanisation se développe en l'absence d'air dans un réacteur fermé. Elle résulte de l'action de micro-organismes microbiens sur des effluents soit liquides (lisiers, produits agroalimentaires, boues de stations d'épuration), soit solides (déchets organiques municipaux ou industriels, déjections animales, résidus de récolte). Les différentes étapes conduisent à la production d'un biogaz riche en méthane (biométhane) généralement utilisé comme source de chaleur et pour produire de l'électricité. À noter que le méthane extrait du biogaz après purification peut aussi être injecté dans le réseau de gaz naturel. L'hydrogène (le $bioH_2$) peut être obtenu à partir du biogaz par une méthode de vaporeformage voisine de celle mise en œuvre pour les combustibles fossiles. Une unité utilisant ce type de procédé est en

fonctionnement depuis une dizaine d'années pour le traitement des ordures ménagères de la région Occitanie (France Hydrogène, 2019b). Son extension à d'autres sites est en cours²⁶. La production d'hydrogène avec ce procédé est assez modeste (10 kg d'H₂ à 99,9 % par jour et par pilote), mais un nombre important d'unités de traitement de déchets pourrait être potentiellement concerné, et des productions d'H₂ locales à petite échelle pourraient s'avérer compétitives. Un autre avantage de l'adjonction d'unités de production d'H₂ serait de rendre les unités de méthanisation et de traitement de déchets autosuffisantes. Une partie de l'hydrogène ainsi produit pourrait alimenter une ou plusieurs piles à combustible (voir chapitre 7), ce qui rendrait l'exploitation indépendante sur le plan énergétique (voir aussi chapitre 8, section « L'agriculture »).

Transformation thermochimique

La filière thermochimique est réservée au traitement d'un type de biomasse particulier, la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicellulose et lignine). Elle met en œuvre une séquence complexe d'opérations de séchage, de thermolyse et de gazéification (France Hydrogène, 2019b). L'énergie nécessaire pour ces réactions est apportée par oxydation ou combustion partielle d'une partie de la ressource (transformation autothermique). Le produit final est un gaz de synthèse, lequel est, dans le contexte actuel, principalement consommé en tant que source de chaleur et d'électricité et dans des utilisations (carburants de synthèse, méthanol) autres que la production d'hydrogène. On peut conclure qu'en général la production d'hydrogène à partir de la biomasse reste encore peu exploitée.

I Production à partir d'organismes photosynthétiques (algues)

Les organismes photosynthétiques comme les algues peuvent produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire en utilisant l'eau comme donneur d'électrons et de protons sans dégagement parallèle de CO₂. Un procédé totalement propre basé sur la photosynthèse peut être envisagé, avec comme source d'énergie le soleil et comme ressource l'eau. En général, deux phases, une oxygénique de croissance de la biomasse et une anoxique de production d'hydrogène, doivent être distinguées. Leur optimisation fait actuellement l'objet de recherches fondamentales en laboratoire.

I Décomposition plasma de gaz naturel

Comme vu plus haut, il existe plusieurs procédés en dehors du vaporeformage et de l'oxydation partielle pour la production d'H₂ à partir des combustibles fossiles. Parmi ceux-ci, il faut mentionner la décomposition du gaz naturel en hydrogène et carbone

26. *Bioénergie International*, « Le procédé VaBHyoGaz transforme le biogaz en hydrogène renouvelable », F. Douard, 28 juin 2022, <https://www.bioenergie-promotion.fr/94114/le-procede-vabhyogaz-transforme-le-biogaz-en-hydrogene-renouvelable>

par des procédés plasma. Le gaz naturel traité par torche plasma fournit de l'hydrogène. Le carbone est récupéré sous forme de noir de carbone qui est commercialisé comme sous-produit. Cette filière de production d'H₂ résout le problème de l'émission de CO₂. Elle constitue donc une alternative aux technologies de séquestration dont le but est de limiter les émissions de CO₂ associées au vaporeformage. Toutefois, elle a le défaut majeur de continuer à utiliser comme ressource un combustible fossile. Malgré les attentes qu'elle suscite, elle ne s'est pas pour le moment imposée comme une alternative aux autres méthodes de conversion des matériaux carbonés.

La recherche sur les processus de production d'hydrogène

Les activités de recherche et de développement sur la production de l'hydrogène sont aujourd'hui très importantes. Elles impliquent une communauté scientifique nombreuse et bien structurée, à la fois dans les universités et les grands organismes de recherche comme le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), les établissements publics comme le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ou l'IFP Énergies nouvelles (IFPEN) et les sociétés privées comme Air Liquide. Ces activités disposent d'un affichage et de financements conséquents au niveau national comme européen²⁷.

À l'heure actuelle, l'électrolyse est probablement le domaine qui bénéficie du principal effort de recherche. Cet état de fait résulte des fortes attentes suscitées par cette technologie dans le contexte de la transition énergétique, mais aussi de certains choix industriels récents (par exemple sur l'hydrogène vert). Les travaux sont centrés sur l'amélioration des rendements associés à la production d'H₂ par électrolyse et sur la minimisation du coût énergétique des procédés. En comparaison, les recherches sur les autres méthodes sont de nature plus fondamentale. Les niveaux d'avancement et de mise au point peuvent être très variables, allant du travail exploratoire au laboratoire (par exemple les micro-organismes photosynthétiques) à la construction de prototypes (par exemple la conversion de la biomasse ou la décomposition plasma). Le caractère très dynamique et foisonnant des recherches en cours doit être souligné. Les travaux sur les nouveaux procédés de production d'hydrogène présentent de réelles perspectives de découvertes et d'avancées significatives pouvant impacter très fortement et à court terme tout le secteur de l'énergie.

27. Voir par exemple, au niveau national, les sites PEPR-H₂ (<https://www.pepr-hydrogene.fr>), la Fédération de recherche Hydrogène du CNRS (FRH₂, <https://frh2.cnrs.fr/actualites>) et, au niveau européen, le site Hydrogen Europe Research (<https://hydrogeneuroperesearch.eu>) et celui de la Commission européenne (https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/energy/hydrogen_en).

Conclusion : une production d'hydrogène appelée à évoluer

Plusieurs éléments sont à souligner pour évaluer le rôle que l'hydrogène est censé devoir jouer dans la transition énergétique. Aujourd'hui, l'H₂ provient en grande majorité de matériaux carbonés fossiles (hydrogène gris), et l'hydrogène vert reste très minoritaire. Cette situation est entretenue par des facteurs macroéconomiques comme le prix de l'énergie et de l'électricité, qui avantagent fortement l'utilisation des énergies fossiles au détriment des autres procédés. Pourtant, de nombreuses méthodes existent pour produire de l'H₂, mais aujourd'hui l'électrolyse est la seule qui paraît à même de pouvoir concurrencer l'utilisation des matériaux carbonés fossiles. Cette situation peut toutefois se modifier rapidement sous l'influence de plusieurs facteurs :

- la tendance globalement en déclin de l'utilisation des combustibles fossiles (progrès des énergies renouvelables, réglementations internationales) nourrit des scénarios prospectifs de disparition à terme de l'hydrogène gris au profit de l'hydrogène vert (voir chapitre 5) ;
- le dynamisme des recherches sur les modes de production artificielle de l'H₂ et les espoirs suscités par l'hydrogène naturel (voir chapitre 4) pourraient faire émerger de nouvelles filières d'approvisionnement en hydrogène ;
- certaines méthodes de production d'H₂ techniquement spécifiques, bénéficiant d'un environnement localement favorable en ressources et/ou en énergie et fonctionnant à petite échelle (par exemple la biomasse), pourraient s'imposer dans une logique de production, de distribution et de gestion décentralisée de l'énergie (voir chapitre 6).

L'ensemble du secteur de la production de l'hydrogène est donc appelé à évoluer.

4. L'hydrogène naturel

L'hydrogène naturel (blanc) s'est imposé depuis quelques années comme un point d'intérêt particulier au sein de la thématique hydrogène. Il nourrit en effet chez le grand public le fantasme d'une nouvelle ressource énergétique d'origine naturelle, comme l'a été en son temps le pétrole. Ce chapitre retrace l'évolution des conceptions scientifiques autour de l'hydrogène naturel. Les découvertes récentes sont détaillées ainsi que les implications pour la recherche et l'exploitation des ressources en hydrogène naturel.

L'hydrogène naturel existe-t-il ?

L'hydrogène a été considéré pendant très longtemps comme quasiment absent dans la nature. En effet, les fluides géologiques sont en général dépourvus d' H_2 . Par exemple, les gaz émis par les volcans contiennent une grande variété d'espèces chimiques (H_2O , CO_2 , H_2S – hydrogène sulfuré, SO_2 – dioxyde de soufre, HCl – acide chlorhydrique, HF – fluorure d'hydrogène, etc.), mais en général pas d' H_2 . Dans les parties profondes de la croûte continentale, les fluides géologiques sont principalement constitués d' H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2 (diazote) et d'espèces chlorurées. Néanmoins, des exemples de fluides naturels hydrogénés étaient connus de longue date. L' H_2 est présent en quantité dans les fluides des gisements sédimentaires d'uranium (Dubessy *et al.*, 1988), où il provient de la dissociation de la molécule d'eau (H_2O) sous l'effet de la radioactivité (phénomène de radiolyse). Par ailleurs, on connaissait quelques roches magmatiques (chimiquement très particulières) associées à des fluides hydrocarbonés contenant de l' H_2 et aussi du CH_4 (Nivin, 2016 ; Zgonnik, 2020). Ces observations étaient restées d'importance marginale, et la présence d' H_2 dans des fluides naturels a été longtemps reléguée à une éventualité exceptionnelle. Il faudra attendre le début du xxi^e siècle pour qu'un changement de paradigme intervienne, sous l'influence de plusieurs découvertes.

Avant de les détailler ci-dessous, il est utile de revenir sur la vision classique d'une quasi-absence de l'hydrogène à l'état naturel. En effet, cette vision peut paraître curieuse, car la Terre est une planète globalement riche en hydrogène (Toulhoat et Zgonnik, 2022). Celui-ci est en grande partie combiné avec d'autres éléments (principalement avec l'oxygène sous la forme H_2O ou sous la forme OH^-), ce qui le rend non mobilisable ni utilisable sous la forme moléculaire H_2 . Toutefois, l'oxygène n'est pas uniformément réparti dans les profondeurs de la planète. Les écorces superficielles (la croûte continentale et le manteau supérieur) sont riches en oxygène (on parlera de conditions oxydantes), tandis que les parties profondes de la Terre (le manteau inférieur et surtout le noyau) en sont appauvries, voire dépourvues (conditions réductrices). Malgré cette quasi-absence d'oxygène, l'hydrogène pourrait se rencontrer en profondeur sous la forme d'hydrures métalliques (MH_x , où M représente un métal comme le fer) ou sous sa forme moléculaire

H₂. La Terre pourrait ainsi alimenter des sources profondes d'hydrogène primordial à l'origine d'une émission diffuse d'H₂ vers les parties plus superficielles (Toulhoat et Zgonnik, 2022). Par ailleurs, l'établissement de conditions localement réductrices (déficitaires en oxygène) dans certains environnements géologiques particuliers de la croûte terrestre pourrait conduire à la réduction de l'eau et à la production d'H₂ naturel d'origine plus superficielle. Comme on va le voir, les mécanismes d'oxydo-réduction sont à la base des explications avancées pour la plupart des découvertes récentes d'hydrogène naturel. On peut conclure que la vision classique de la quasi-absence de l'hydrogène naturel ne permet plus de rendre compte de la réalité et doit donc être abandonnée.

Les découvertes récentes d'hydrogène naturel

Il faut distinguer deux groupes parmi les découvertes récentes sur l'hydrogène naturel, respectivement l'hydrogène sous-marin et l'hydrogène continental. Du point de vue chronologique, la perception dans la communauté scientifique de la présence systématique d'H₂ au niveau des océans (Charlou *et al.*, 2002) a légèrement précédé les découvertes sur les continents (Zgonnik, 2020 ; Larin *et al.*, 2014). Toutefois, dans les deux cas, il s'agit de découvertes très jeunes, ayant moins de 30 ans d'âge. Ce n'est que très récemment que le sujet de l'hydrogène naturel a rejoint les préoccupations globales autour de l'H₂ et de la transition énergétique.

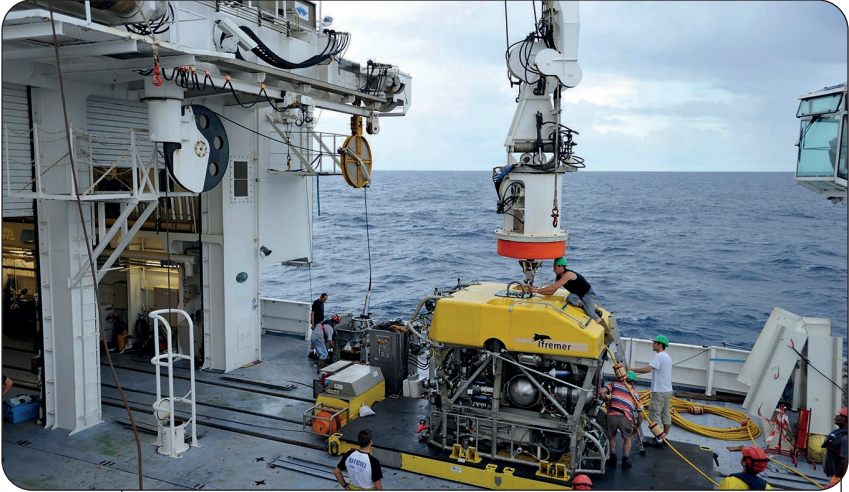
L'hydrogène sous-marin

La découverte de sources hydrothermales sous-marines riches en hydrogène, que l'on peut situer au début du ^{xxi}^e siècle (Charlou *et al.*, 2002), est le résultat des programmes scientifiques internationaux d'exploration des fonds océaniques mis en œuvre depuis les années 1970-1980. Autour d'organismes principalement implantés en Bretagne (Ifremer, Brest, figure 4.1), les équipes de recherche françaises ont joué un rôle essentiel dans ces programmes.

Ces campagnes d'exploration ont abouti à la découverte des premières sources hydrothermales sous-marines (1977-1978 ; figure 4.2). Celles-ci sont localisées sur le plancher océanique, et plus particulièrement au niveau des rides médio-océaniques. Ces dernières, de véritables chaînes de volcans distribués sur plusieurs milliers de kilomètres au fond des océans, marquent la frontière entre les grandes plaques lithosphériques. C'est le cas par exemple de la dorsale médio-atlantique qui sépare les deux plaques africano-européenne et américaine. L'activité hydrothermale est marquée par l'émission de sources chaudes dont les manifestations remarquables (activité biologique notamment) ont été largement popularisées. Le fonctionnement de ce type de système hydrothermal sous-marin demande une source d'eau (eau de mer) et une source de chaleur (magma). L'eau de mer s'infiltre dans la croûte océanique, se réchauffe, réagit avec les roches encaissantes, et le fluide chimiquement modifié

ressort sous la forme de panaches hydrothermaux chauds (350 °C) qui déposent sur place leur charge en minéraux et en métaux dissous. Ces sources constituent donc un exemple de système géothermique, leur spécificité tenant à leur caractère sous-marin.

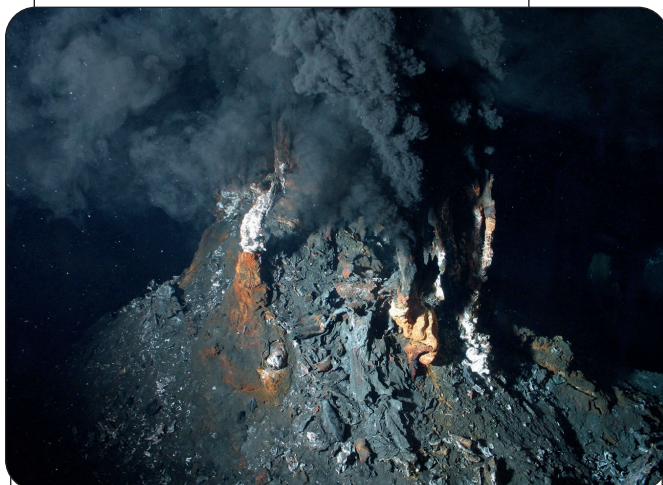
Figure 4.1. Lancement d'un véhicule sous-marin d'exploration des fonds océaniques sur un navire océanographique de l'Ifremer.



Source : © O. Dugornay / Océanothèque Ifremer, 2009.
Enquête du BEA – ROV Victor 6000 stabilisé sur la plage arrière du *Pourquoi pas ?*
<https://image.ifremer.fr/data/00551/66327>

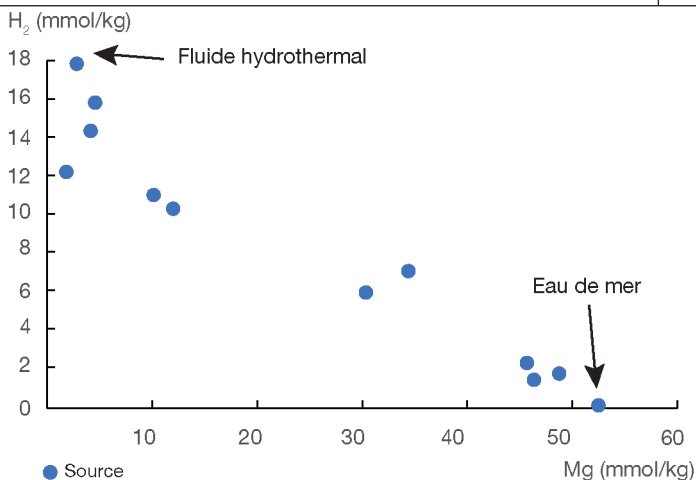
Dans une deuxième phase (campagnes dans l'océan Atlantique réalisées au cours des années 1990-2000), des concentrations anormalement élevées d' H_2 et de CH_4 ont été détectées dans l'eau de mer à l'aplomb de certains segments de la dorsale médio-atlantique. Mentionnons aussi les résultats des équipes américaines sur la dorsale est-Pacifique, qui avaient dès 1979 détecté la présence d'hydrogène et de méthane. Ces émissions gazeuses particulières ont été rapportées au fonctionnement de certains systèmes hydrothermaux océaniques qui ont pu être localisés puis étudiés en détail (Charlou *et al.*, 2002). Un des exemples les mieux connus de ces systèmes est le site Rainbow. Ce champ hydrothermal, d'une surface d'environ 100×200 m, comprend une dizaine de sources émettrices à environ 2 300 m sous le niveau de la mer. Les fluides hydrothermaux montrent des concentrations en H_2 (et aussi en CH_4) très élevées, de beaucoup supérieures à celles des autres champs hydrothermaux connus à l'époque (figure 4.3). Depuis, d'autres champs hydrothermaux ayant des caractéristiques similaires à celles de Rainbow (voire même des concentrations en H_2 supérieures) ont été trouvés et étudiés.

Figure 4.2. Exemple de source hydrothermale produisant de l'hydrogène sur le site Rainbow.



Source : Océanothèque Ifremer, 2013. Cheminées hydrothermales actives.
<https://image.ifremer.fr/data/00702/81434>

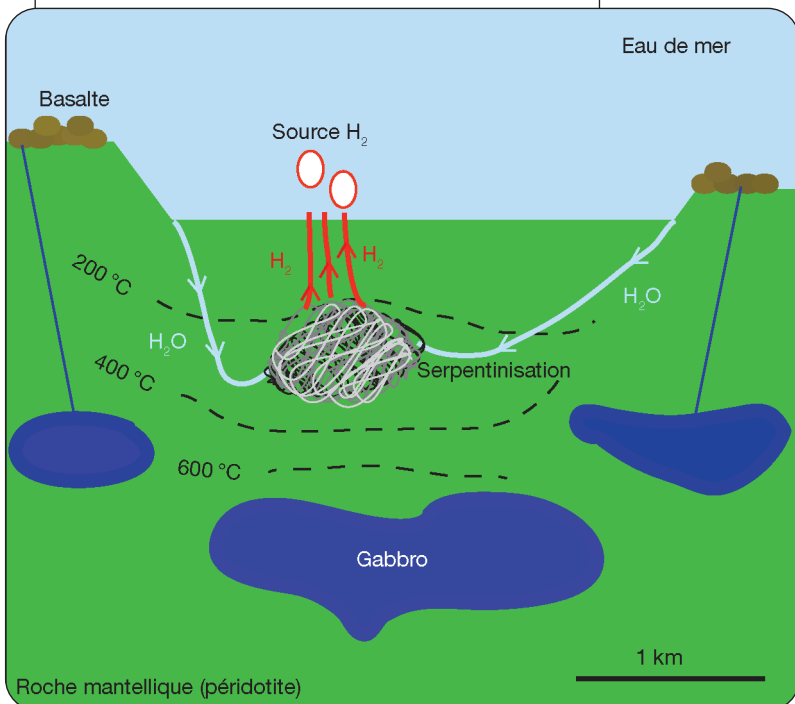
Figure 4.3. Concentration en hydrogène en fonction du magnésium dans les sources du site Rainbow.



Les symboles correspondent aux différentes sources analysées. Les concentrations en H₂ indiquent un mélange entre l'eau de mer (H₂ = 0 mmol/kg) et un fluide hydrothermal de concentration homogène autour de 16 mmol/kg d'H₂. Source : d'après Charlou *et al.* (2002).

La présence d'hydrogène dans ces sources s'explique par la nature particulière des roches encaissantes dans lesquelles l'eau de mer circule et réagit. L'hydrogène est uniquement produit dans les systèmes hydrothermaux développés sur des roches mantelliques de type péridotite, alors que ceux développés sur des roches magmatiques de type basalte ne dégagent que peu d' H_2 . Dans la plupart des rides océaniques, l'activité magmatique fournit des coulées qui s'épanchent et recouvrent le plancher océanique (basaltes), ou se solidifient dans la croûte (gabbros). Ces roches constituent l'encaissant des systèmes hydrothermaux et contrôlent la chimie des fluides émis. Toutefois, dans le cas des rides lentes (comme c'est le cas pour la ride médio-atlantique où se situe le site Rainbow), la production magmatique est peu importante. Le manteau terrestre (composé en majorité de péridotite) affleure au fond de l'océan, de larges portions n'étant pas recouvertes par du basalte (figure 4.4). L'eau de mer va donc pouvoir s'infiltrer, se réchauffer et réagir avec la péridotite. Des mécanismes réactionnels spécifiques (voir section « Dans les océans » ci-dessous) vont s'enclencher et contrôler la chimie des sources, dont en particulier la production d' H_2 . Le contexte géologique local joue donc un rôle clé dans la genèse de l' H_2 .

Figure 4.4. Schéma explicatif général du mécanisme de production d'hydrogène dans la croûte océanique.



■ L'hydrogène continental

L'existence de structures émettrices d'hydrogène en Europe de l'Est et en Asie figurait déjà dans les travaux de la littérature russe publiés au siècle dernier, lesquels ont notamment fait l'objet d'une compilation exhaustive (Zgonnik, 2020). Mais l'intérêt de la communauté scientifique internationale pour l'hydrogène continental est beaucoup plus récent. On peut dire qu'il commence vraiment avec la publication fondatrice de 2014 (Larin *et al.*, 2014) et qu'il n'a pas cessé de croître depuis. Ce travail décrivait de nombreuses structures productrices d'hydrogène dans la partie russe du craton (bloc de croûte continentale ancienne) européen. Ces structures circulaires sont de tailles variables (de la centaine de mètres jusqu'à plusieurs kilomètres de diamètre) et elles sont distribuées sur une vaste surface allant de la Russie au Kazakhstan. En général, ce sont des dépressions dont le bord est marqué par des zones blanchies indiquant des modifications dans la végétation. À l'intérieur de ces structures, la concentration en hydrogène du sol est très élevée (figure 4.5). Des émanations gazeuses d'hydrogène accompagnées d'une petite quantité de méthane sont également présentes.

Figure 4.5. Exemple de structure circulaire productrice d'hydrogène au Brésil. On note l'impact sur la végétation.



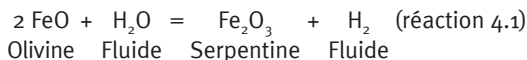
Source : Myagkiy *et al.*, 2020, © A. Prinzhofer.

Suite à ce travail, des structures productrices d'hydrogène ont été trouvées sur quasiment tous les continents, en particulier les continents d'âge ancien (cratons). Celles-ci ont des caractéristiques (structures circulaires, figure 4.5) voisines de celles découvertes sur le craton est-européen. C'est le cas en particulier en Afrique de l'Ouest, au Brésil ou en Australie (Prinzhofer *et al.*, 2018 ; Moretti *et al.*, 2021). Le nombre de ces structures circulaires peut être localement très important (cas de plusieurs centaines, voire milliers de ces structures dans certaines zones explorées au Brésil ; Moretti *et al.*, 2021). Les flux d'H₂ au niveau de ces structures sont élevés, de l'ordre de quelques tonnes d'H₂/km² de surface émettrice/jour (Larin *et al.*, 2014). Mais les continents exposent aussi d'autres types de structures génératrices d'hydrogène. C'est le cas des émissions d'H₂ spatialement associées à des zones de failles au Brésil, ces dernières représentant de grands accidents tectoniques marquant la limite entre différents blocs crustaux le long desquels des fluides hydrogénés produits en profondeur peuvent remonter (Prinzhofer *et al.*, 2024). Enfin, l'absence de dégagements d'hydrogène de surface n'indique pas nécessairement la non-existence en profondeur d'un système générateur d'H₂ (Maiga *et al.*, 2024). Il semble donc que la production d'hydrogène sur les continents puisse emprunter plusieurs voies.

Comment l'hydrogène naturel est-il produit ?

Dans les océans

La péridotite, qui réagit avec l'eau de mer pour produire l'hydrogène, est la roche la plus abondante du manteau supérieur de la Terre. Elle contient de grandes quantités d'olivine à côté d'autres minéraux, essentiellement des pyroxènes. C'est l'interaction entre cette roche riche en olivine et l'eau (cette dernière étant portée à haute température suite à son infiltration dans la croûte océanique) qui produit l'H₂. La réaction chimique qui décrit ce mécanisme d'interaction fluide-roche peut s'écrire de façon simplifiée :



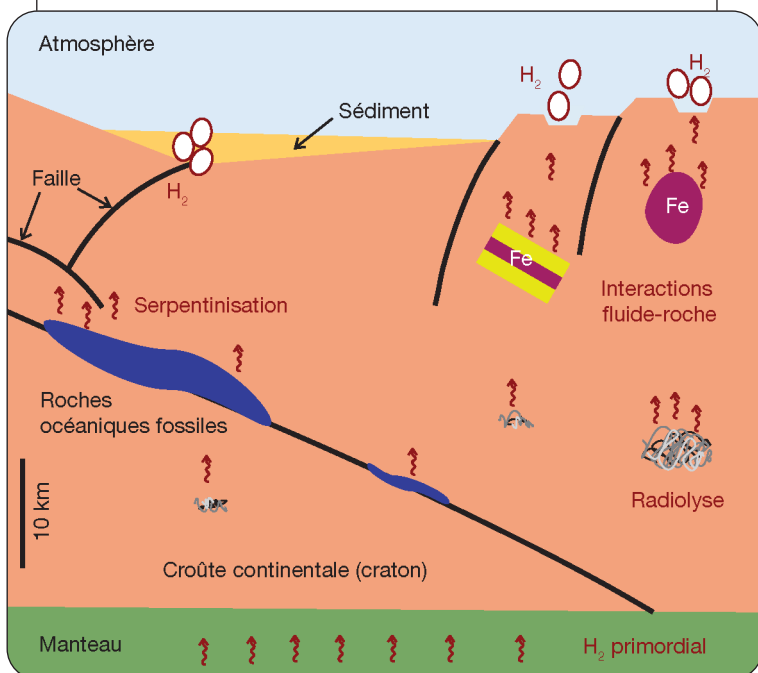
Il s'agit d'une réaction d'oxydo-réduction. L'oxydation du fer ferreux (FeO) de l'olivine en fer ferrique (Fe₂O₃) est couplée à la réduction de l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂). On peut la considérer comme une réaction de dissociation de l'eau analogue aux mécanismes de types thermolyse-cycles thermochimiques évoqués au chapitre 3 (voir « Autres méthodes »). Toutefois, cette réaction est complètement naturelle, et elle intervient dans une gamme de températures (200-350 °C) bien inférieure aux procédés artificiels. La source de l'H₂ est l'eau de mer qui est dissociée, et la source de chaleur est l'activité magmatique omniprésente dans la croûte océanique en contexte de ride (basaltes, gabbros, figure 4.4). Le fer ferrique (Fe₂O₃) produit

par la réaction sert à stabiliser de nouveaux minéraux qui remplacent l'olivine : les serpentines. Les géologues nomment « serpentinitisation » l'ensemble de ce processus naturel d'altération de la croûte océanique par l'eau de mer, les roches formées étant des serpentinites.

I Sur les continents

L'origine des dégagements d'hydrogène observés sur les continents est plus incertaine. Le manque d'informations directes sur les formations géologiques profondes (ou l'existence d'informations seulement indirectes comme la géophysique) limite en effet les interprétations. De plus, divers mécanismes sont à considérer et plusieurs peuvent se combiner sur un même site. Comme on le voit sur la figure 4.6, parmi ces mécanismes, certains sont d'origine profonde et d'autres plus superficielle. La présence d'hélium dans les sols, à côté des anomalies de concentrations en H_2 , constitue un bon indice d'une source profonde d'hydrogène (Prinzhofer *et al.*, 2024). Il reste toutefois à distinguer l'hydrogène correspondant au dégazage

Figure 4.6. Schéma explicatif général des différents mécanismes générateurs d'hydrogène dans la croûte continentale (épaisseur estimée à 40 km).



primordial de la Terre (Toulhoat et Zgonnik, 2022) et celui produit par des mécanismes plus superficiels et locaux au sein de la croûte continentale. À ces derniers sont associées l'ensemble des interactions fluide-roche, qui peuvent impliquer une large gamme de formations géologiques, dont certaines roches riches en fer susceptibles de réduire (et donc de dissocier) l'eau et de produire de l'hydrogène. L'existence de croûtes océaniques fossiles incorporées au sein des continents au cours de l'histoire géologique peut conduire à une production d' H_2 par des processus analogues à ceux observés actuellement au niveau des rides océaniques (serpentinisation). Les autres mécanismes générateurs d'hydrogène les plus souvent considérés en contexte continental comprennent la radiolyse, en particulier pour les formations géologiques riches en éléments radioactifs comme les granites ou les gneiss. Mentionnons aussi les processus de surface comme l'activité bactérienne et la maturation naturelle de la biomasse.

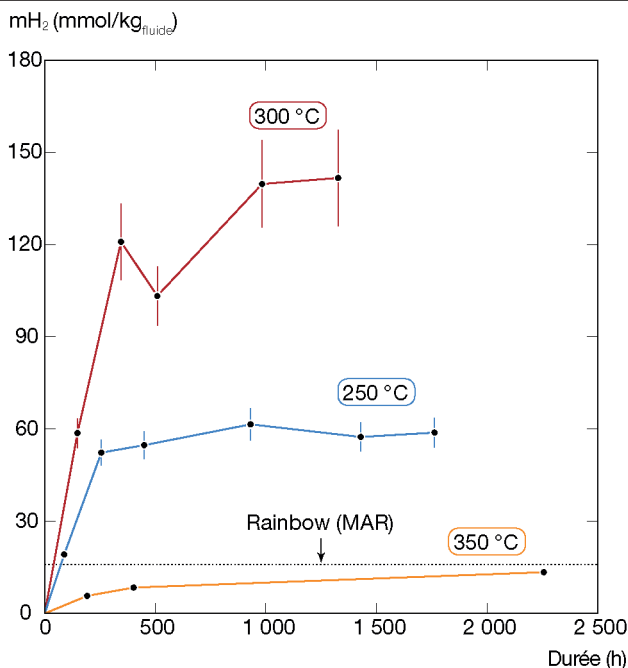
Les systèmes hydrogénés continentaux sont aujourd'hui étudiés de façon globale et plus uniquement sous l'angle des mécanismes générateurs de l' H_2 . De nouvelles questions se sont fait jour sur les processus de migration de l'hydrogène depuis la zone source, son piégeage éventuel dans des structures ou des formations géologiques favorables, et sur les facteurs pouvant conduire à son accumulation locale. De même, la prise en compte des facteurs de dispersion de l'hydrogène tels que la désorption de l' H_2 piégé dans les sols, les sources ou les émissions gazeuses diffuses vers l'atmosphère, l'activité bactérienne consommatrice de l' H_2 , permet d'estimer plus précisément les flux d' H_2 mis en jeu sur les sites explorés.

■ Procédés de production d'hydrogène géo-inspirés

Les progrès réalisés dans la connaissance des mécanismes naturels de production d'hydrogène nourrissent les recherches sur de nouveaux procédés artificiels de production d' H_2 . Ces procédés, calqués sur des processus naturels (« géo-inspirés »), complètent les recherches actuelles sur la production d'hydrogène résumées au chapitre 3 (voir en particulier les sections « Autres méthodes » et « La recherche sur les processus de production d'hydrogène »). Ainsi, les systèmes hydrothermaux océaniques servent de modèles à de nouvelles voies de production d' H_2 qui s'appuient sur la simulation au laboratoire du processus de serpentinisation. La serpentinisation expérimentale produit des quantités d' H_2 très élevées (environ 20 fois supérieures aux systèmes naturels de type Rainbow), et le gaz peut être directement récupéré. Le gain important en H_2 par rapport aux systèmes naturels s'explique par la large dispersion de l'hydrogène au niveau des rides médio-océaniques, alors qu'au laboratoire l'hydrogène peut être confiné. Comme le mécanisme à l'œuvre dans la nature, le procédé expérimental nécessite de l'olivine ou une roche riche en ce minéral, de l'eau et une source de chaleur. Des températures au minimum de 200-250 °C sont nécessaires pour déclencher les interactions fluide-roche, le maximum de concentration en H_2 du fluide étant obtenu autour de 300-320 °C (figure 4.7). Au laboratoire, la

source de chaleur est d'origine électrique, mais pourrait toutefois être d'origine renouvelable (solaire ou éolien) dans une logique de type procédé. Soulignons que l' H_2 est obtenu directement sans qu'il soit nécessaire d'intercaler une étape d'électrolyse. Ce mécanisme de production d' H_2 présente donc l'avantage considérable d'être indépendant des développements autour de l'électrolyse, dont le coût économique constitue actuellement le principal verrou pour l'obtention d' H_2 vert.

Figure 4.7. Concentration en H_2 des fluides en fonction du temps dans des essais de serpentinisation expérimentale réalisés à différentes températures sous une pression totale (P_{Tot}) de 50 MPa.



On note l'augmentation progressive des concentrations en H_2 avec le temps et des concentrations en H_2 dans les essais jusqu'à 20 fois supérieures à celles des systèmes naturels océaniques (comme Rainbow, sur la ride médio-atlantique, MAR).

Source : Fauguerolles, 2016.

Les phases minérales produites dans les essais de serpentinisation au laboratoire sont principalement des serpentines, comme c'est le cas dans les systèmes naturels. Ces minéraux ne sont ni de grande utilité pratique ni d'importante valeur commerciale en

tant que sous-produits. Toutefois, il est possible de faire réagir les serpentines avec du CO_2 s'il est présent en grandes quantités dans le fluide. Ceci conduit à l'apparition de phases minérales carbonatées qui fixent le CO_2 . Les serpentines peuvent donc s'avérer très utiles pour séquestrer le CO_2 . Cette observation ouvre la voie à un procédé de laboratoire en deux étapes : une première de production d' H_2 (par serpentinisation), et une seconde de stockage du CO_2 (par carbonatation des serpentines produites). À l'heure actuelle, la validation technique et économique de ce procédé, potentiellement utile à la fois pour la production d'énergie et l'environnement (stockage du CO_2), est en cours. Toutefois, ce double mécanisme est à la base de l'hydrogène orange (Osselin *et al.*, 2022), dont la production combine des réactions d'hydrogénation et de carbonatation induites par l'injection de fluides dans le milieu naturel.

L'hydrogène naturel : de l'exploration à l'exploitation

De façon générale pour les ressources naturelles, qu'elles soient énergétiques ou minérales, la phase d'exploitation fait suite à la phase d'exploration et de découverte de la ressource ou du gisement. On distingue classiquement entre les deux une phase d'évaluation qui va déterminer la suite à donner à la découverte, c'est-à-dire son abandon (temporaire ou définitif) ou sa mise en exploitation. La valorisation de l'hydrogène naturel en étant encore à ses débuts, il est utile d'analyser la situation actuelle le concernant à la lumière de ces notions générales sur les ressources naturelles.

Exploration de l'hydrogène naturel : premier bilan et exemples

Des compilations des sites de production d'hydrogène naturel à l'échelle mondiale sont aujourd'hui disponibles (figure 4.8). Trois environnements géologiques favorables à d'éventuels travaux d'exploration y sont définis : les dorsales (ou rides) océaniques, les ophiolites (roches d'origine océanique charriées sur les continents) et les cratons (portions de croûtes continentales d'âge ancien). Tous les océans et tous les continents apparaissent comme des cibles d'exploration potentielle pour l' H_2 . Notons que les subdivisions introduites récemment pour distinguer, sur les continents, les structures circulaires et les zones d'émission localisées le long de failles (Prinzhofer *et al.*, 2024) ne sont pas prises en compte. Il est aussi important de remarquer que les systèmes identifiés le sont sur la base d'émissions ou de concentrations en H_2 repérées en surface. L'existence de systèmes océaniques ou continentaux « cachés » (sans manifestations superficielles, qu'elles soient absentes ou non encore reconnues) n'est donc pas impossible. Enfin, on ne peut écarter la possibilité de systèmes producteurs d'hydrogène dans des contextes géologiques non encore clairement identifiés, comme illustré ci-dessous. Ces compilations sont donc préliminaires, mais elles sont néanmoins utiles pour guider les stratégies globales d'exploration de l'hydrogène naturel.

Dans l'analyse qui suit, il est nécessaire de distinguer ce qui concerne l'hydrogène des fonds océaniques et celui des continents. En effet, l'exploration de ces deux types d'hydrogène naturel met en œuvre des technologies, des méthodes et des concepts complètement différents. D'autre part, comme nous le verrons en fin de chapitre, la phase d'évaluation a abouti à écarter pour le moment toute exploitation des sources hydrothermales océaniques génératrices d' H_2 . Par conséquent, seule l'exploration de l'hydrogène sur les continents sera discutée ci-dessous. Pour ce faire, quatre sites représentatifs de différents niveaux d'avancement des travaux serviront d'illustration.

Bretagne Nord

La Bretagne est une région prometteuse pour la présence d'hydrogène naturel. Elle contient les principaux éléments constitutifs d'un environnement géologique favorable : anciennes roches d'origine mantellique, roches plus jeunes mais localement riches en fer, nature globalement granitique du sous-sol, grandes failles d'échelle crustale (voir « Sur les continents », figure 4.6 et, au chapitre 8, « La géologie régionale »). Une campagne d'exploration de l'hydrogène a été récemment effectuée en Bretagne Nord, plus particulièrement dans la baie de Morlaix. Elle a été conduite par une entreprise privée en collaboration avec d'autres sociétés, des universités et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), et a été financée en partie par le conseil régional. Cette campagne a fait l'objet d'un compte-rendu détaillé dans la presse régionale (*Le Télégramme*²⁸). Ses résultats n'ont pas encore été publiés, mais les mesures réalisées en surface (principalement des analyses de gaz dans les sols) ont fourni des concentrations en H_2 localement élevées. Ces indices prometteurs nécessitent une confirmation et des investigations plus approfondies, actuellement en cours. Les travaux en Bretagne Nord sont représentatifs d'un stade d'exploration de l'hydrogène dans sa phase initiale de détection d'anomalies de concentration éventuelles.

Lorraine

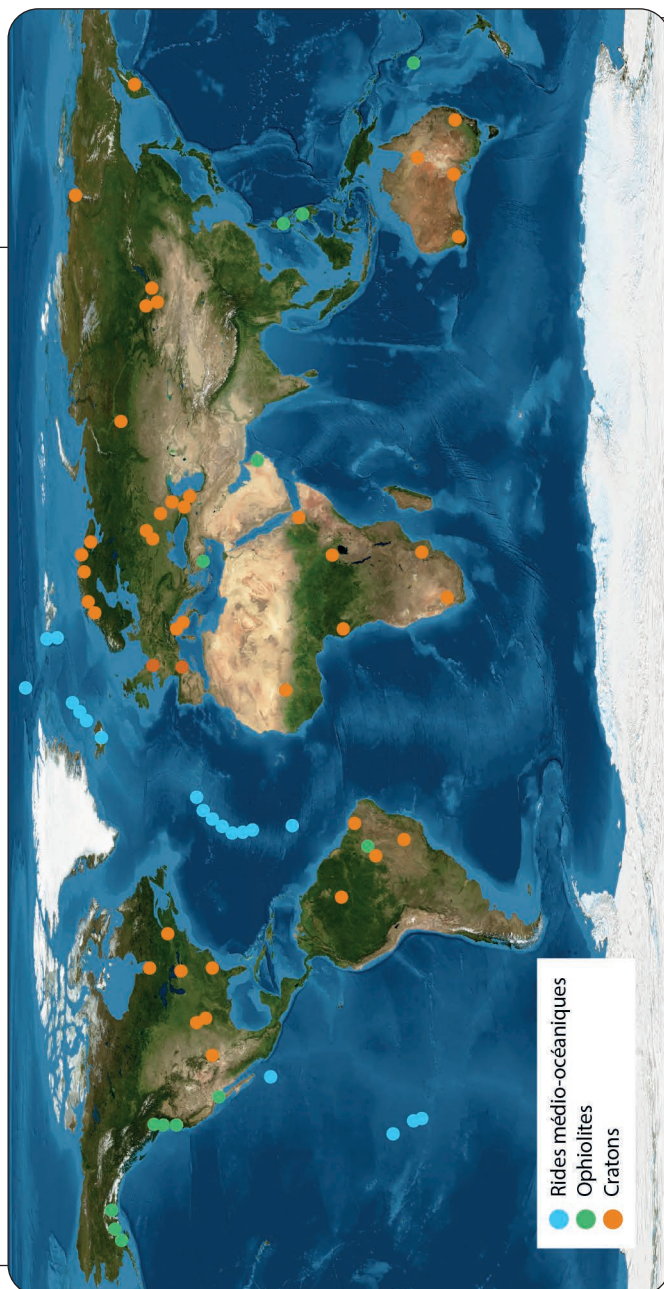
Cette région ne figure pas *a priori* parmi les zones les plus favorables pour la production d'hydrogène naturel. Toutefois, des quantités très importantes d'hydrogène ont été trouvées fortuitement dans un forage réalisé pour exploiter le gaz de charbon dans l'ancien bassin minier²⁹. Les annonces (plusieurs depuis mai 2023) font état de concentrations en H_2 de l'ordre de 20 % dans le mélange gazeux à 1 200 m de profondeur dans le forage, ce qui conduirait à des réserves d' H_2 sur l'ensemble du bassin minier très importantes, du même ordre de grandeur ou supérieures à la production mondiale annuelle³⁰. Cependant, les chiffres initialement avancés n'ont pas encore

28. *Le Télégramme*, « Hydrogène blanc : nouvel or noir pour la Bretagne ? », F. Jacq, 7 septembre 2023, <https://www.letelegramme.fr/bretagne/hydrogene-blanc-un-nouvel-or-noir-dans-les-sols-bretons-6422808.php>

29. *Reporterre*, « L'hydrogène, le fantasme du Grand Est », B. Mathieu et A. Labit, 20 avril 2024, <https://reporterre.net/L-hydrogene-le-fantasme-du-Grand-Est>

30. *Journal du CNRS*, « Un gisement géant d'hydrogène en Lorraine ? », K. Bettayeb, 6 juillet 2023, <https://lejournald.cnrs.fr/articles/un-gisement-geant-dhydrogene-en-lorraine>

Figure 4.8. Distribution des principaux sites de production d'hydrogène naturel au niveau mondial.



Tous les océans et tous les continents sont concernés.
Source : Prinzhofer et Rigollet, 2022.

été confirmés dans des publications scientifiques. Une incertitude existe aussi sur le mécanisme à l'origine de l'H₂, qui pourrait être soit continu et permanent (l'hydrogène pourrait donc se renouveler), soit accidentel (l'hydrogène présent serait ainsi rapidement épuisé). Ce cas est représentatif du caractère encore aléatoire des découvertes concernant l'hydrogène naturel, et il illustre le besoin de consolider les connaissances scientifiques (mécanismes de production, estimation des flux et des réserves d'H₂) pour envisager un passage à la phase d'exploitation. Pour cela, un forage d'exploration est prévu³¹.

Zone nord-ouest des Pyrénées

Une campagne systématique d'analyse des sols pour l'H₂ (également pour CO, CO₂, CH₄, H₂S, O₂ et radon), couplée à des mesures géophysiques, a été effectuée à grande échelle dans une zone au nord-ouest des Pyrénées. Ce secteur est dépourvu de toute manifestation d'hydrogène en surface (émanations ou dégagements gazeux). Néanmoins, plusieurs critères faisaient de cette zone une cible intéressante pour l'exploration d'H₂ :

- la présence de corps de roches mantelliques à 8-10 km de profondeur dans la croûte ;
- l'existence de failles majeures pouvant servir de drains à des fluides d'origine profonde ;
- des facteurs susceptibles de favoriser la circulation des fluides ;
- la présence de roches sédimentaires pouvant piéger l'H₂ (Lefevre *et al.*, 2021 ; 2022).

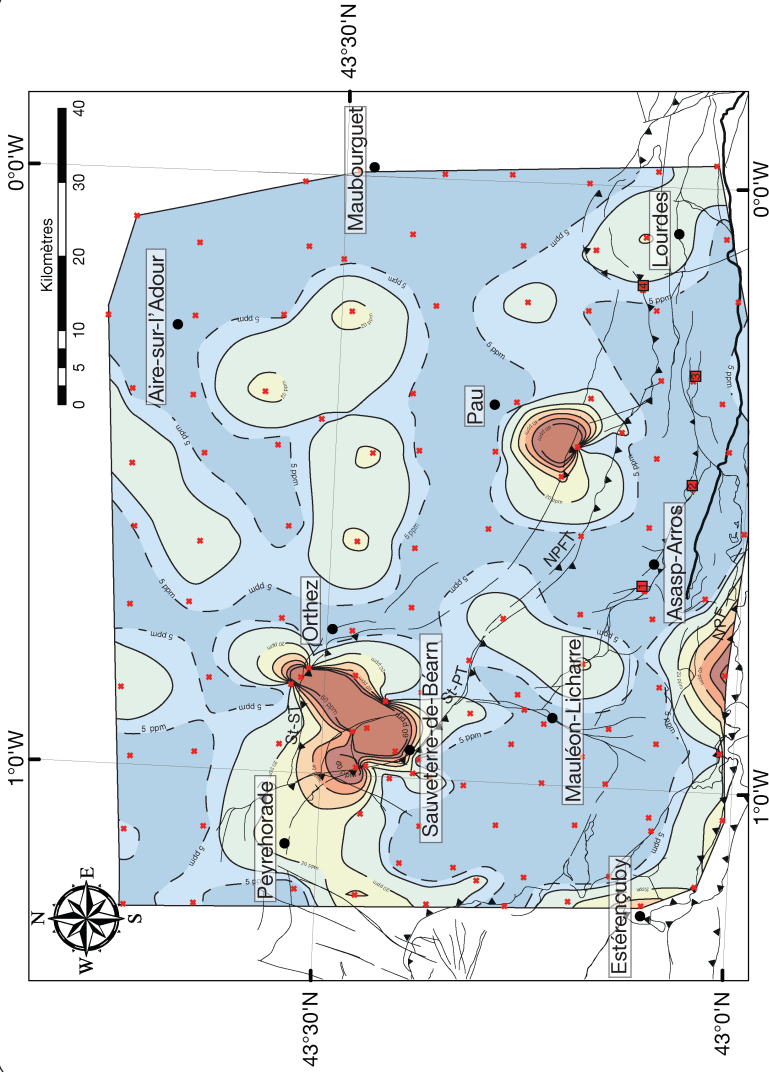
L'étude a abouti à la définition de zones à concentrations élevées d'H₂ dans les sols (figure 4.9) dont la distribution est contrôlée par un système de failles enraciné en profondeur. La majorité de l'hydrogène proviendrait de la serpentinisation des roches mantelliques sous-jacentes. Les fluides hydrogénés migrent le long des failles et s'accumulent dans des roches sédimentaires de type évaporite qui servent de piège. Ce cas est représentatif d'un stade d'exploration avancé reposant sur des méthodologies solides et un jeu de données exhaustif. En utilisant les contraintes de géologie locale, un modèle d'ensemble du système hydrogéné a pu être construit, depuis la source, de la migration jusqu'au piégeage de l'H₂. Le calcul du flux d'hydrogène atteignant la surface dans la zone de faille fournit une première indication pour estimer les réserves potentiellement disponibles.

Bourakébougou (Mali)

Les explorations dans la région de Bourakébougou (Mali), menées à partir de 2008, faisaient suite à une explosion survenue dans un forage hydrogéologique, un accident dû à l'inflammation d'une poche de gaz qui s'est révélée être de l'hydrogène quasiment pur (Prinzhofer *et al.*, 2018 ; Prinzhofer et Rigollet, 2022). Après une phase

31. *Le Républicain Lorrain*, « Ressource en hydrogène et pistes futures de son exploitation : le forage a démarré à Pontpierre », N. Thierry, 25 novembre 2025, <https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2025/11/23/ressource-en-hydrogene-et-pistes-futures-de-son-exploitation-le-forage-a-demarre-a-pontpierre>

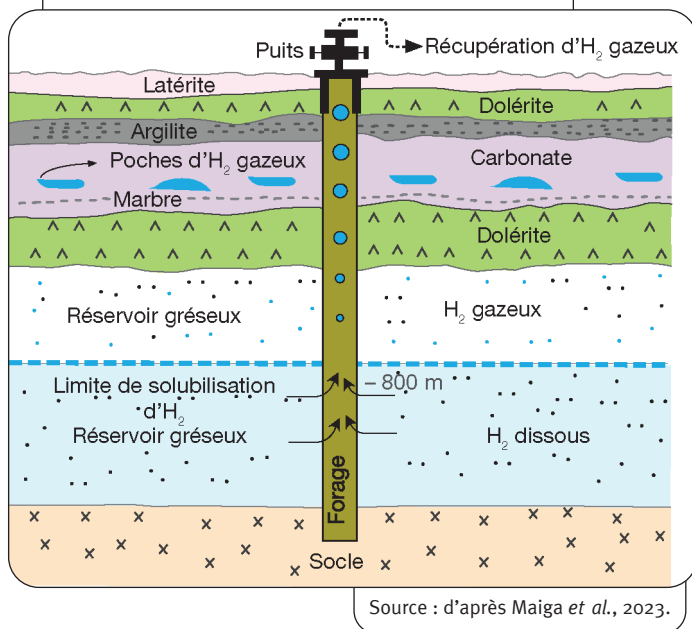
Figure 4.9. Contours de concentration en H_2 des sols dans la zone nord-ouest des Pyrénées.



Trois zones à forte concentration ressortent clairement. Source : Lefeuvre *et al.*, 2021.

préliminaire d'analyse des sols, des dégagements gazeux et des sources, une exploration intégrée a été déployée. Elle a combiné les données de géologie de terrain, l'analyse de carottes de forage, les études géochimiques, les datations isotopiques et la modélisation géologique. Les résultats ont abouti à une caractérisation détaillée de la géométrie et du fonctionnement du réservoir d' H_2 de Bourakébougou. Ce système générateur d'hydrogène se trouve dans un bassin de roches sédimentaires déposé sur le craton ouest-africain. Il s'étend sur plusieurs kilomètres, et des anomalies de surface en H_2 sont constatées dans un rayon de 150 km. Plusieurs zones réservoirs ont été identifiées à différentes profondeurs (figure 4.10).

Figure 4.10. Modèle de réservoir pour le gisement d'hydrogène naturel de Bourakébougou, Mali.



L'hydrogène provient des grès inférieurs, lesquels contiennent du fer et des minéraux susceptibles de réduire et de dissocier l'eau en hydrogène. Toutefois, les roches du craton sous-jacent sont la source la plus probable de l' H_2 . En profondeur, l'hydrogène est solubilisé dans les fluides. Lorsque ceux-ci remontent, l'hydrogène se sépare et s'accumule dans la porosité. Des cavités ouvertes contenant de l' H_2 gazeux se forment dans les carbonates. Le niveau de dolérite supérieur joue le rôle de couche imperméable, ce qui favorise la chenalisation de l' H_2 dans les puits en exploitation.

Bourakébougou apparaît comme un modèle pour les systèmes hydrogénés développés sur un craton, même si le réservoir se situe dans des formations sédimentaires relativement jeunes. Comme c'est souvent le cas dans ce genre de contexte, le mécanisme générateur de l' H_2 reste incertain. C'est un système dynamique qui se recharge en continu, l'hydrogène présentant un caractère renouvelable et renouvelé. Le réservoir superficiel est rechargé par les réservoirs plus profonds lors de la décompression associée à la remontée des fluides, également amplifiée par l'émission et la récupération de l' H_2 en surface. Bourakébougou, par la connaissance qu'on a de son fonctionnement, de la géométrie des structures d'accumulation et de la nature des formations qui assurent le piégeage de l' H_2 en subsurface, peut être qualifié de premier « gisement » reconnu d'hydrogène naturel. Il est d'ailleurs déjà en exploitation, puisque l'hydrogène émis dans l'un des forages est utilisé pour la production locale d'électricité.

■ Évaluation et exploitation de l'hydrogène naturel

Les exemples qui précèdent montrent bien la nécessité de caractériser le plus complètement possible à l'aide de méthodes scientifiquement reconnues les indices des potentiels sites d'exploitation de l'hydrogène naturel avant d'envisager de passer à la phase d'exploitation. La découverte de gisements d'hydrogène naturel ne peut se passer d'une connaissance actualisée de la géologie (régionale comme locale) et d'une approche d'exploration multidisciplinaire qui peut demander un investissement sur plusieurs années. Dans le cas de l'hydrogène continental, l'évaluation de la ressource se doit d'utiliser les connaissances scientifiques acquises durant la phase d'exploration, et notamment :

- la nature de la source et du mécanisme générateur de l' H_2 ;
- la nature des formations et des structures géologiques (régionales et locales) susceptibles de contrôler le fonctionnement (migration, accumulation, piégeage, dégagements, pertes) du système hydrogène ;
- l'existence d'un modèle dynamique du système d'alimentation ;
- les flux d'hydrogène mis en jeu.

L'hydrogène étant extrêmement mobile, le « rendement » du système (la fraction d'hydrogène récupérable par rapport à la fraction produite, la différence étant la fraction dispersée dans l'environnement ou l'atmosphère, ou consommée en surface) est un aspect critique à prendre en compte dans une perspective d'exploitation. Enfin, le suivi sur de longues durées du flux d' H_2 émis dans des forages de préproduction semble indispensable pour confirmer la stabilité de l'approvisionnement et démontrer la viabilité de la ressource.

Toutefois, les critères d'évaluation de nature scientifique ne sont pas les seuls. D'autres peuvent entrer en ligne de compte, l'exemple des sources hydrothermales océaniques étant de ce point de vue instructif. Ces systèmes ont été pendant un certain temps considérés comme des ressources potentielles d'hydrogène naturel. En effet, le

mécanisme générateur de l'H₂ est bien compris. Il a valeur générale pour les dorsales lentes qui, sur Terre, s'étirent sur une longueur cumulée très supérieure à 10 000 km. Des quantités importantes d'H₂ naturel sont produites par serpentinitisation, même si le calcul précis des flux est difficile. Il pourrait donc être envisagé d'exploiter ces systèmes en tant que ressources d'H₂ naturel. Toutefois, cette hypothèse ne fait actuellement plus partie des stratégies d'exploitation de l'hydrogène blanc. L'extraction d'H₂ à partir de ces sources n'est en effet pas envisagée principalement à cause des difficultés technologiques associées à la récupération de l'H₂ à des profondeurs de l'ordre de 2 000-4 000 m et à des températures de 250-400 °C au fond des océans.

À titre de comparaison, l'exploitation pétrolière *offshore* se limite actuellement à des tranches d'eau de mer inférieures à 2 000 m. La dispersion importante de l'hydrogène produit au niveau des dorsales (figure 4.7) représente aussi un défi pour sa récupération. Notons toutefois que des analogues de ces systèmes océaniques sont présents en surface, comme c'est le cas en Nouvelle-Calédonie (Deville et Prinzhofer, 2016). L'île expose en effet de vastes lambeaux de lithosphère océanique émergés sur le continent (ophiolites, figure 4.8), portés à la surface suite à l'affrontement entre les plaques pacifique et australienne. Les unités mantelliques de ces ophiolites sont le site d'émanations gazeuses riches en hydrogène et en méthane (et également en azote) dont l'origine est attribuée à un mécanisme de serpentinitisation de basse température impliquant des eaux de surface (Deville et Prinzhofer, 2016). Leur éventuelle exploitation pour l'hydrogène ne nécessiterait pas de surmonter les formidables difficultés techniques associées à la récupération de l'H₂ au fond des océans.

Bien entendu, les critères économiques et socio-économiques interviennent pour une part souvent décisive dans les décisions de mise en exploitation. Ces aspects sont évoqués plus en détail au chapitre 7 mais, d'ores et déjà, il apparaît clairement que la production d'hydrogène blanc est beaucoup moins coûteuse que l'hydrogène gris. Le nombre de sites producteurs d'hydrogène est actuellement encore trop faible pour que des conclusions définitives soient tirées sur son exploitation, mais on s'attend à ce que la récupération de l'hydrogène blanc sur les continents soit technologiquement assez simple (par simple forage au niveau des zones réservoirs ou d'accumulation) et aussi assez peu coûteuse pour l'environnement.

Enfin, l'exploration et l'exploitation de l'hydrogène naturel demandent des adaptations de la législation et de la réglementation en cours. À titre d'exemple, des autorisations pour la recherche d'hydrogène naturel ont été tout récemment accordées (Légifrance, 2023). Le premier permis attribué concerne une zone de 225 km² dans les Pyrénées-Atlantiques, et plusieurs autres demandes pour des projets similaires seraient à l'étude. Un cadastre numérique qui recense les titres miniers en cours (permis d'exploration, demandes, autorisations, etc.), avec les limites géographiques et le statut des permis, est désormais disponible et consultable par le grand public³².

32. Camino, le cadastre minier numérique : <https://camino.beta.gouv.fr>

Conclusion : quelle place pour l'hydrogène naturel ?

Grâce aux avancées scientifiques des dernières décennies, et notamment aux découvertes dans les fonds océaniques et continentaux, l'hydrogène naturel est reconnu comme une ressource potentielle importante. Réalité incontournable, l'hydrogène naturel peut effectivement représenter une nouvelle source d'énergie. Ce nouvel état de fait n'empêche pas les interrogations sur les flux d'hydrogène naturel et sur la fraction récupérable et utilisable pour les besoins énergétiques. Néanmoins, les connaissances scientifiques ont largement progressé, et l'exploration de l'hydrogène naturel entre aujourd'hui dans une phase mature. Les grands types d'environnements géologiques favorables sont connus, et les principaux mécanismes générateurs d'hydrogène ont été identifiés. Les protocoles d'exploration, facilités par les aménagements dans la législation et la réglementation, se sont précisés et affinés avec la prise en compte des spécificités associées à la recherche de l'hydrogène naturel. Cependant, le nombre très limité de sites actuellement en exploitation illustre bien les incertitudes qui persistent encore dans l'évaluation de cette ressource. Soulignons que l'hydrogène naturel bénéficie d'une expérience de quelques années seulement. Bien que sa place en tant que source d'énergie future reste encore incertaine, l'hydrogène naturel représente une opportunité majeure qui apporte une dimension nouvelle aux rôles (vecteur et stockage de l'énergie, voir chapitre 7) déjà reconnus à l'H₂ dans la transition énergétique.

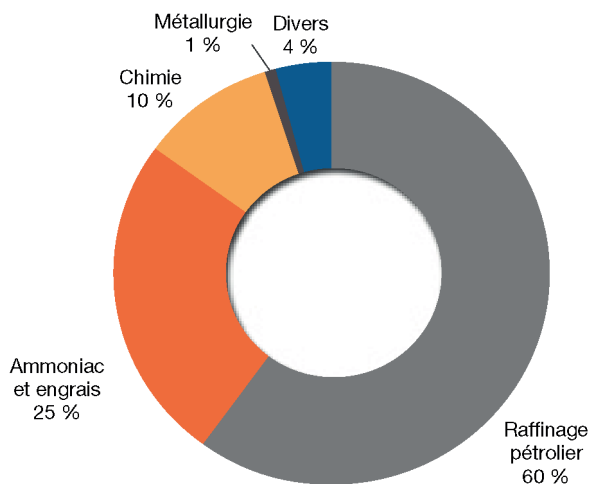
5. Les usages de l'hydrogène

Dans l'utilisation qui est faite de l'hydrogène, il est essentiel de faire la distinction entre, d'une part, la situation actuelle, qui repose sur des données chiffrées de consommation d' H_2 , et, d'autre part, les usages futurs, ces derniers étant évalués à partir de projections réalisées à l'échelle de plusieurs décennies. Les deux aspects sont présentés séparément dans ce chapitre.

La consommation actuelle d'hydrogène

Les données de 2020 (RTE, 2020) font état d'une demande mondiale en H_2 d'environ 110 Mt/an (70 Mt d'hydrogène pur et 40 Mt de mélange avec d'autres gaz), dont près de 1 Mt pour la France. Les ordres de grandeur restent les mêmes actuellement, avec une demande atteignant 100 Mt en 2024 au niveau mondial (IEA, 2026). L'utilisation principale de l'hydrogène concerne le raffinage de produits pétroliers. Par ailleurs, combiné à l'azote, il est nécessaire pour la production d'ammoniac qui est ensuite utilisé principalement dans la fabrication d'engrais. En chimie, il sert à la fabrication du méthanol ; il est également utilisé en métallurgie, en verrerie, etc. (figure 5.1).

Figure 5.1. Répartition de la consommation d'hydrogène en France en 2020.



Source : RTE, 2020.

Au niveau mondial, on peut regrouper la consommation en hydrogène en deux grandes parts d'importance sensiblement égale, le raffinage pétrolier et l'industrie.

Les usages de l'hydrogène en tant que combustible énergétique restent pour l'instant encore anecdotiques (sous forme liquide, c'est le carburant utilisé pour la propulsion des lanceurs de navettes spatiales et de satellites). Son utilisation dans le secteur des transports fait partie des développements futurs discutés plus loin dans ce chapitre. L'essentiel de l'hydrogène consommé étant actuellement de l'hydrogène gris, les activités industrielles génèrent des émissions de CO₂ d'environ 10 Mt/an pour la France (RTE, 2020). Un des objectifs des politiques publiques (définis dans la loi Énergie et Climat et dans les projets de programmation pluriannuelle de l'énergie et de Stratégie nationale bas-carbone) est de « décarboner » l'hydrogène utilisé à des fins industrielles (voir chapitre 6).

Les projections dans le futur

Elles sont fournies par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), organisme émanant de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et qui fait autorité au niveau international. Cette section s'appuie sur la version 2021 du rapport de l'AIE (IEA, 2021), ces données étant représentatives des grandes tendances actuelles. Les projections détaillées qui y figurent sont réalisées à l'échelle mondiale. Elles font appel au scénario de développement durable (modèle SDD), un cadre général développé par l'AIE pour planifier la demande et l'utilisation future de l'énergie en conformité avec les objectifs internationaux de décarbonation et de limitation du réchauffement climatique. En ce qui concerne l'hydrogène, les projections font apparaître des modifications majeures par rapport à la situation actuelle, sur la production comme sur les types d'utilisation de l'H₂.

Production d'hydrogène

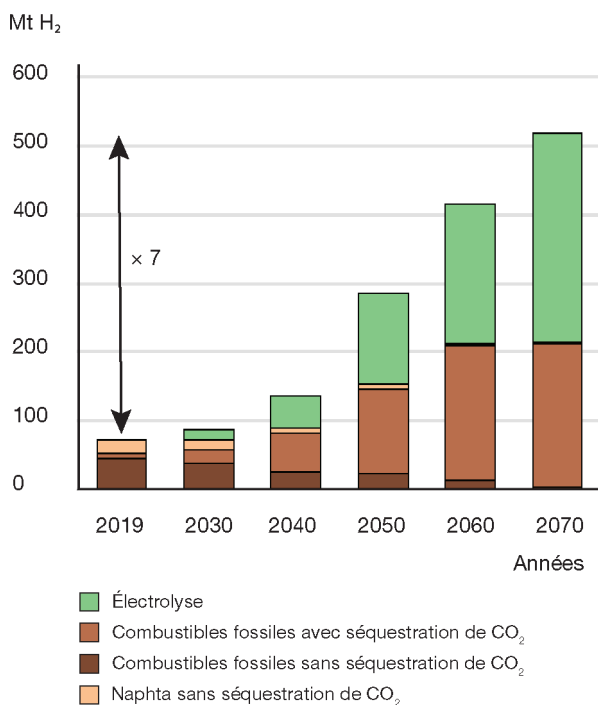
La demande globale d'H₂ devrait croître fortement pour atteindre un facteur $\times 7$ par rapport à la situation actuelle à l'horizon 2070 (520 Mt d'H₂ pur, figure 5.2). Cette évolution se justifie par le rôle pivot de l'hydrogène dans la transition énergétique (voir section « Utilisation de l'hydrogène » ci-dessous et chapitre 6). L'accroissement de la production serait assuré par la combinaison de plusieurs facteurs :

- le développement de l'électrolyse comme méthode privilégiée d'obtention de l'H₂, cette technologie devenant dominante à partir de 2060 ;
- la généralisation de l'emploi des technologies de séquestration du CO₂, permettant ainsi de continuer à utiliser les combustibles fossiles pour produire de l'H₂ ;
- la diminution progressive et la disparition à terme de l'H₂ gris et des procédés émetteurs de CO₂ (dont ceux utilisant le naphtha, voir chapitre 3, section « Vaporeformage »), car non associés à des technologies de séquestration.

En 2070, environ 60 % de l'H₂ serait produit par électrolyse et 40 % à partir des combustibles fossiles, essentiellement de l'hydrogène bleu.

Il faut noter que les résultats des projections avec le modèle SDD de l'AIE reposent sur un double pari. Tout d'abord, sur l'émergence de l'électrolyse comme méthode de production d' H_2 compétitive par rapport à l'utilisation des énergies fossiles (voir chapitres 3 et 7). Ce gain de compétitivité serait obtenu, d'une part, par des facteurs d'échelle (augmentation de la taille et de la puissance des électrolyseurs), et, d'autre part, par l'amélioration des rendements de l'électrolyse et par le développement des énergies renouvelables (éolien, solaire principalement), permettant une diminution du coût de l'électricité (voir chapitre 3, section « Electrolyse et hydrogène vert ») à l'échelle locale, sinon globale. Ensuite, le modèle SDD est basé sur la capacité des technologies de séquestration du CO_2 à pouvoir s'imposer et se généraliser (voir chapitre 3, section « L'hydrogène produit aujourd'hui est principalement gris »). Ce point est essentiel car, dans la projection, les combustibles fossiles continuent d'être sollicités pour

Figure 5.2. Production mondiale d'hydrogène de 2019 jusqu'à l'horizon 2070.



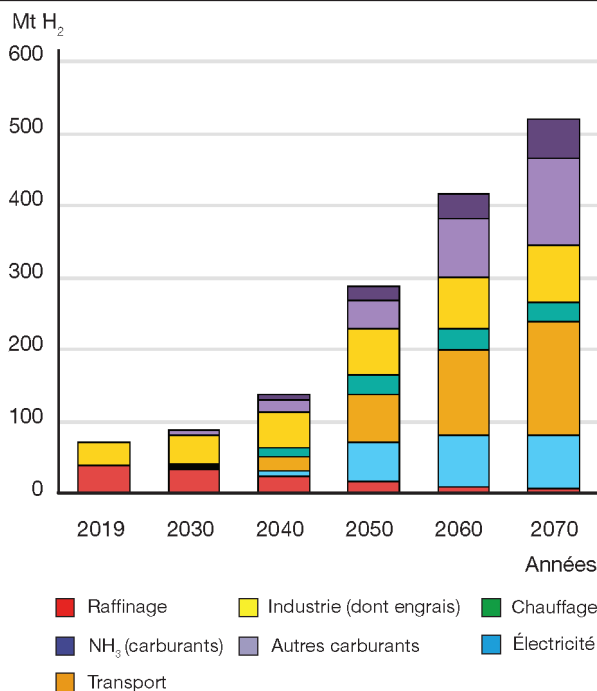
Source : projection SDD, données IEA, 2020.

une part majeure dans la production d'H₂ en 2070 (figure 5.2). Or, le captage du CO₂ peine encore à s'imposer, même s'il fait l'objet de multiples annonces³³.

■ Utilisation de l'hydrogène

Selon le modèle SDD de l'AIE, l'hydrogène dans le futur serait principalement consommé dans les transports, la production électrique, le chauffage des bâtiments, les carburants, l'industrie et le raffinage (figure 5.3). L'utilisation directe pour les transports (voitures, camions, bateaux) s'élève à 30 % de l'hydrogène disponible en 2070, tandis que

Figure 5.3. Consommation mondiale d'hydrogène de 2019 jusqu'à l'horizon 2070.



Source : projection SDD, données IEA, 2020.

33. *Le Monde*, « En Norvège, un site de stockage attend encore son carbone », A. Pécout, 8 janvier 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/01/07/en-norvege-un-site-de-stockage-attend-son-carbone-desesperement_6485271_3234.html, et « Le Royaume-Uni mise gros sur le captage de CO₂ », J. Zaugg, 8 janvier 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/01/06/le-royaume-uni-mise-gros-sur-le-captage-de-carbone_6484763_3234.html

20 % sont utilisés dans la production de carburants de synthèse pour le secteur aérien et 10 % sont convertis en ammoniac, qui intervient comme carburant pour le secteur maritime. L'industrie utiliserait 15 % de l'hydrogène disponible, principalement pour la chimie (dont l'ammoniac et les engrais) et la métallurgie. Les secteurs de l'électricité (15 %) et du chauffage des bâtiments (5 %) sont les autres utilisateurs importants.

Le modèle fait apparaître des modifications majeures dans les types de consommation de l'H₂ au regard de la situation actuelle (figure 5.1). D'un côté, la part de l'H₂ dans le raffinage pétrolier diminue fortement (figure 5.3), cette évolution étant à mettre en relation avec la disparition programmée des combustibles fossiles dans le mix énergétique futur (voir chapitre 6). De l'autre côté, le secteur des transports apparaît comme d'importance significative à partir de 2040. En 2070, il totalise 60 % de la consommation totale d'hydrogène si l'on regroupe l'H₂ utilisé directement pour les véhicules à hydrogène, électriques ou hybrides, et l'H₂ intervenant comme composant des carburants de synthèse ou dans la production d'ammoniac. Globalement, le transport est le principal poste d'utilisation de l'hydrogène dans le futur. On note aussi l'émergence de l'H₂ comme source d'électricité à partir de 2040, un type d'usage totalement absent dans la consommation actuelle.

Conclusion : la consommation d'hydrogène doit aussi évoluer

L'image qui émerge de l'analyse de la consommation de l'H₂ à l'heure actuelle (comme de celle de sa production, qui fait l'objet du chapitre 3) est bien différente de celle dispensée dans les médias. En effet, le raffinage et l'industrie sont aujourd'hui les principaux demandeurs d'hydrogène, lequel est produit très majoritairement à partir des combustibles fossiles. L'hydrogène est encore quasiment absent du secteur des transports et n'intervient pas comme source d'électricité. Nous sommes donc bien loin des types d'utilisation vertueux (hydrogène « vert », énergie « décarbonée », etc.) qui seraient dévolus à l'H₂ et nourrissent les attentes autour de son emploi.

Précisément, ce sont ces derniers types d'utilisation beaucoup plus vertueux qui apparaissent dans les projections futures, dont l'un des intérêts, parmi d'autres, est d'éclairer les modifications profondes qui doivent intervenir à partir de la situation actuelle. Dans les modes de production de l'H₂, des évolutions majeures semblent indispensables. Elles ne vont pas de soi et demandent des mutations risquées, à la mesure de l'urgence des enjeux climatiques et des transformations radicales à opérer autour des ressources énergétiques. En ce qui concerne la consommation future de l'H₂, les projections font apparaître des utilisations (transport, électricité) nouvelles par rapport à la situation actuelle, plus conformes aux attentes suscitées par l'hydrogène et qui donnent des motifs d'espoir pour atteindre les objectifs de la transition énergétique. C'est l'objet des deux prochains chapitres.

6. La transition énergétique

La transition énergétique a déjà été évoquée à maintes reprises dans les chapitres précédents. Avant d'analyser en détail le rôle que l'hydrogène pourrait y jouer, il est utile de rappeler certains éléments clés de cette transition. C'est l'objet de ce chapitre, qui ne prétend nullement à l'originalité tant le sujet continue d'être largement traité, figurant souvent au premier plan de l'actualité. Toutefois, les principaux enjeux technologiques, mais aussi industriels de cette transition doivent être précisés, sans oublier pour autant les dimensions politiques, sociales, environnementales et culturelles de ce qui ressemble à une mutation.

À la différence des projections au niveau mondial présentées au chapitre 5, les analyses qui suivent se focaliseront autant que possible sur la situation française, celle-ci étant prise comme exemple.

Énergie : la situation française actuelle

La production d'énergie en France a fortement augmenté depuis 1980 avec la mise en place du programme nucléaire (données SDES, 2025 ; figure 6.1). Les ressources d'énergies fossiles ont fortement décliné, et elles sont devenues marginales depuis 2000 avec l'arrêt de l'extraction de charbon et de gaz naturel. La part de l'énergie hydraulique (marées comprises) est restée stable. La production d'origine renouvelable (éolien, solaire, biocarburants, biogaz, etc.) progresse régulièrement depuis le milieu des années 2000.

La consommation d'énergie se répartit entre 41 % d'origine nucléaire, 28 % provenant du pétrole, 12 % du gaz naturel, 16 % des énergies renouvelables et déchets et 2 % provenant du charbon (données SDES, 2025 ; figure 6.2). Le bois, qui représente la quasi-totalité de la biomasse solide, demeure la première source d'énergie « renouvelable » consommée en France, loin devant l'électricité d'origine hydraulique.

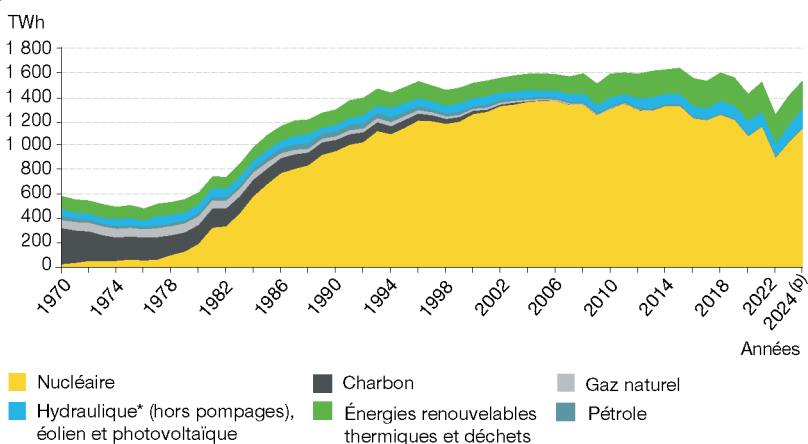
Production et consommation d'énergie ne sont pas identiques. Une fraction significative de l'énergie d'origine nucléaire produite est exportée, tandis que la France importe du pétrole et du gaz naturel. La part du nucléaire dans la consommation ne reflète donc pas sa part dans la production d'énergie. Dans cette dernière, le nucléaire est largement dominant, mais le « mix » énergétique français utilise majoritairement des énergies fossiles. Pétrole, gaz et charbon totalisent collectivement 42 % de l'énergie consommée en 2025, et le nucléaire 41 % (figure 6.2).

En ce qui concerne l'électricité, la production française, stable jusqu'en 2018-2019 (si l'on se focalise sur la période post-2005, figure 6.3), est depuis en déclin. Ceci s'explique par une combinaison de facteurs conjoncturels (crise sanitaire, moindre disponibilité du parc nucléaire) et structurels (voir section « Les scénarios énergétiques

du futur » ci-dessous). L'électricité est majoritairement produite à partir de l'énergie nucléaire et des énergies hydraulique (marées incluses) et thermique (à base de combustibles fossiles, charbon, fioul, gaz naturel, biomasse ou déchets). L'apport des énergies renouvelables (éolien, solaire) est significatif depuis 2010.

La répartition entre les différentes sources d'énergie utilisées pour produire de l'électricité en 2023 (figure 6.4) montre la large prédominance du nucléaire (67 %), suivi de l'hydraulique (13 %), l'énergie thermique étant au même niveau que l'éolien (7-8 %). Les énergies renouvelables atteignent collectivement une part proche de 15 % dans la production d'électricité. En revanche, la part des énergies fossiles dans le « mix » électrique français est assez faible (thermique 7,5 %). L'électricité en France est principalement d'origine nucléaire, tandis que les autres secteurs de consommation (transports, industrie, etc.) sollicitent surtout les énergies fossiles.

Figure 6.1. Évolution de la production d'énergie en France de 1970 à 2024.



(p) provisoire.

* Y compris énergies marines.

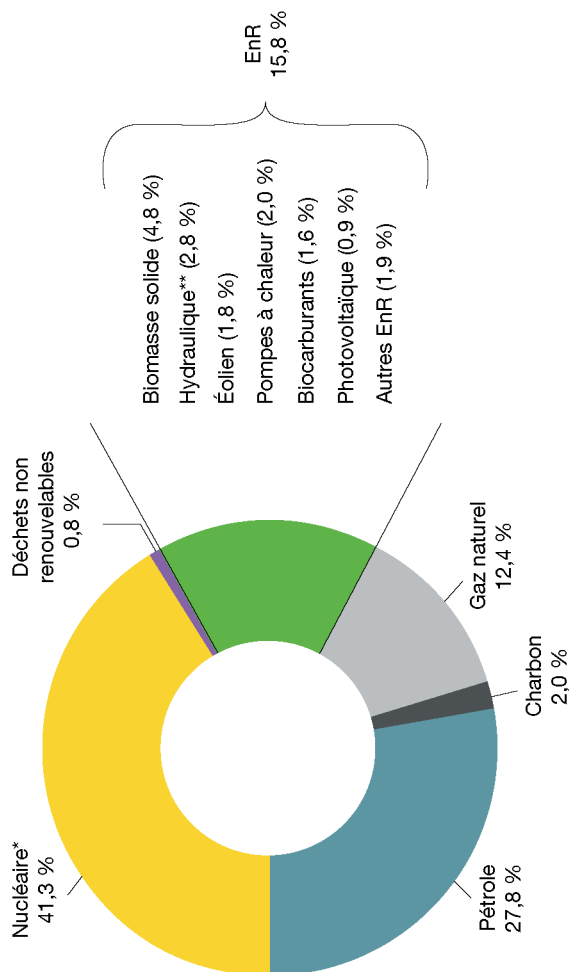
Note : la production nucléaire correspond à la chaleur dégagée par la réaction nucléaire évaluée par convention à environ le triple de la production d'électricité obtenue au final.

Jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.

À partir de 2011, il inclut en outre les cinq départements et régions d'outre-mer.

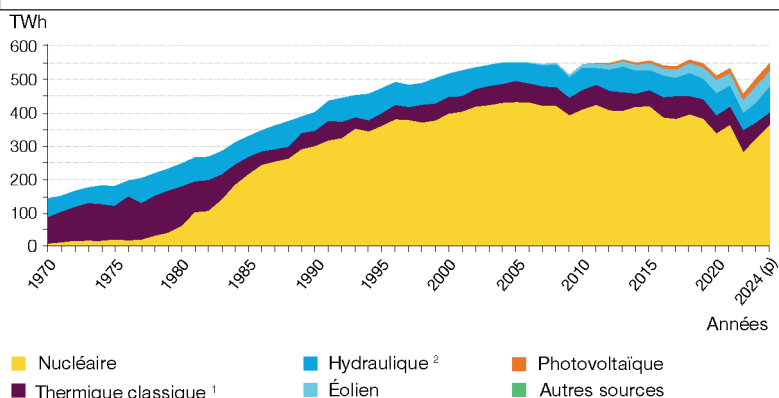
Source : SDES, 2025.

Figure 6.2. Répartition de la consommation d'énergie en France en 2024 (en %, données non corrigées des variations climatiques).



EnR : énergies renouvelables. * Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale comparée à la production nucléaire. ** Hydraulique hors pompages. Note : la production nucléaire correspond à la chaleur dégagée par la réaction nucléaire évaluée par convention à environ le triple de la production d'électricité obtenue au final.

Source : SDES, 2025.

Figure 6.3. Évolution de la production électrique en France de 1970 à 2024.

(p) provisoire.

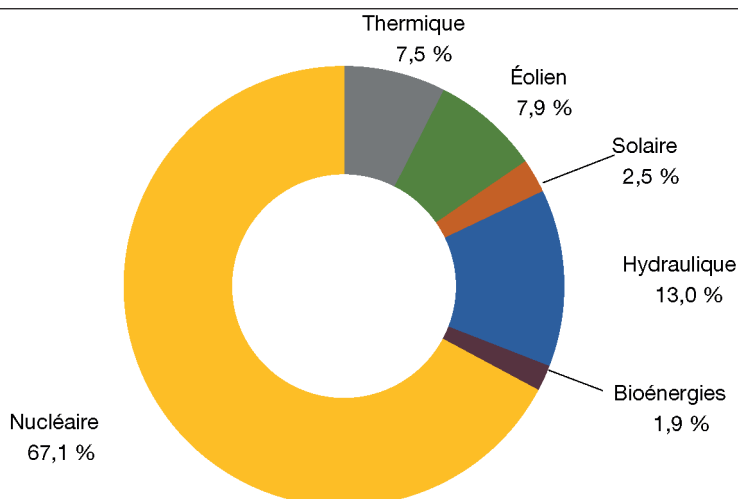
1. Thermique à combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel), biomasse ou déchets.

2. Y compris énergie marémotrice.

Jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.

À partir de 2011, il inclut en outre les cinq départements et régions d'outre-mer.

Source : SDES, 2025.

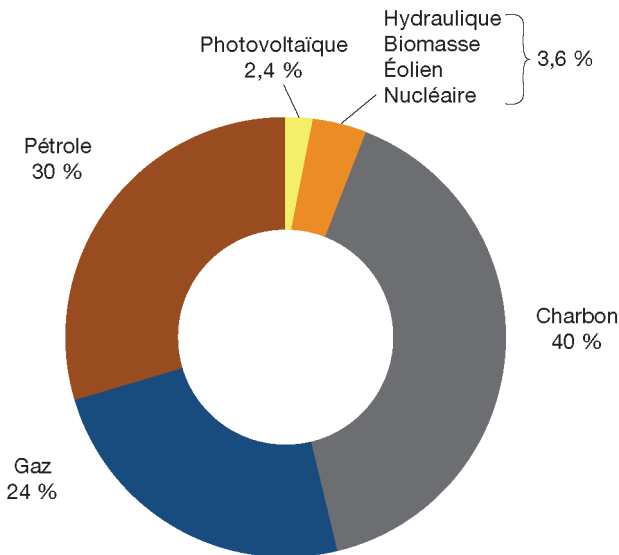
Figure 6.4. Répartition de la production électrique par filière énergétique en France en 2023.Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/transition-energetique-en-france>.

L'ère des changements est arrivée

Les objectifs internationaux de réduction des gaz à effet de serre, de limitation du réchauffement climatique et d'atteinte de la neutralité carbone imposent des changements majeurs dans les sources d'énergie. Pour rester sous la barre des 2 °C de réchauffement climatique de l'Accord de Paris de 2015, il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre et donc développer les énergies qui permettent de décarboner le mix énergétique.

L'impact environnemental (émissions directes de CO₂) des différentes sources d'énergie est très variable. Aucune n'est totalement neutre, mais le charbon, le gaz naturel et le pétrole sont collectivement responsables de presque 95 % des émissions (figure 6.5). Par contre, l'impact environnemental du nucléaire est très faible (0,6 % des émissions). Les énergies renouvelables ont des taux d'émission inférieurs à 1 %, sauf le solaire, qui a un taux de 2-3 % (lié à la fabrication des panneaux photovoltaïques). L'utilisation future de ces ressources énergétiques sera donc beaucoup moins « coûteuse » en termes environnementaux que la poursuite de l'exploitation des combustibles fossiles. Notons que l'hydrogène blanc, avec son

Figure 6.5. Coût environnemental des différentes filières énergétiques en 2018 (en g de CO₂ émis par kWh d'énergie produite, recalculé en %).



Source : GIEC, 2018.

mode de récupération par forage (voir « Évaluation et exploitation de l'hydrogène naturel », chapitre 4), prendrait place parmi les ressources énergétiques très faiblement émettrices en CO₂. La transition énergétique demande donc l'abandon des combustibles fossiles et le choix du nucléaire, des énergies renouvelables et de l'hydrogène naturel. L'hydrogène artificiel pourra toujours être utilisé, mais il devra être produit par une voie non émettrice de CO₂ telle que l'électrolyse (voir « Électrolyse et hydrogène vert », chapitre 3, et « Production d'hydrogène », chapitre 5).

Alors que les États (RTE, 2021a) ont globalement beaucoup progressé dans la reconnaissance d'une nécessaire sortie des énergies fossiles, cette prise de conscience peine encore à s'imposer dans l'opinion. Les annonces de nouvelles découvertes par les grands groupes pétroliers, le soutien continu du secteur bancaire aux projets d'exploration des hydrocarbures sont autant de freins à une prise de conscience plus rapide. Toutefois, l'épuisement des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) est programmé à terme, même si la date du « pic pétrolier » semble devoir en permanence être repoussée. Rappelons que le pétrole est une ressource géologique fossile (et donc finie), alors que sa demande croît (encore) de façon continue. Malgré les incertitudes qui entourent actuellement la date du déclin des énergies fossiles, celui-ci apparaît comme géologiquement inéluctable. Le développement des sources d'énergie alternatives, nucléaire, renouvelables, hydrogène naturel, devrait logiquement s'en trouver favorisé.

Les scénarios énergétiques du futur

Nous avons déjà examiné au chapitre 5 les projections concernant la production et l'utilisation de l'hydrogène dans le futur à l'échelle mondiale. Pour l'énergie prise dans son ensemble et dans le cas de la France, divers scénarios sont apparus au cours des dernières années. Ils ne sont pas tous identiques, et des points de désaccord, voire des divergences existent entre les différents modèles. Toutefois, ils s'accordent sur les mêmes hypothèses de base et aboutissent à des conclusions finalement peu différentes dans leurs grandes lignes. Deux sont détaillés ci-dessous, le modèle du Réseau de transport d'électricité (RTE), qui peut être vu comme le modèle officiel sur lequel repose la politique énergétique future de la France (RTE, 2021a), et le modèle négaWatt, qui est représentatif d'un scénario « alternatif » et qui intègre le futur énergétique dans une perspective globale de sobriété et de changement sociétal (négaWatt, 2022).

Les deux modèles s'inscrivent dans la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC³⁴) et partagent les mêmes hypothèses de base :

- disparition à terme des combustibles fossiles dans le mix énergétique ;

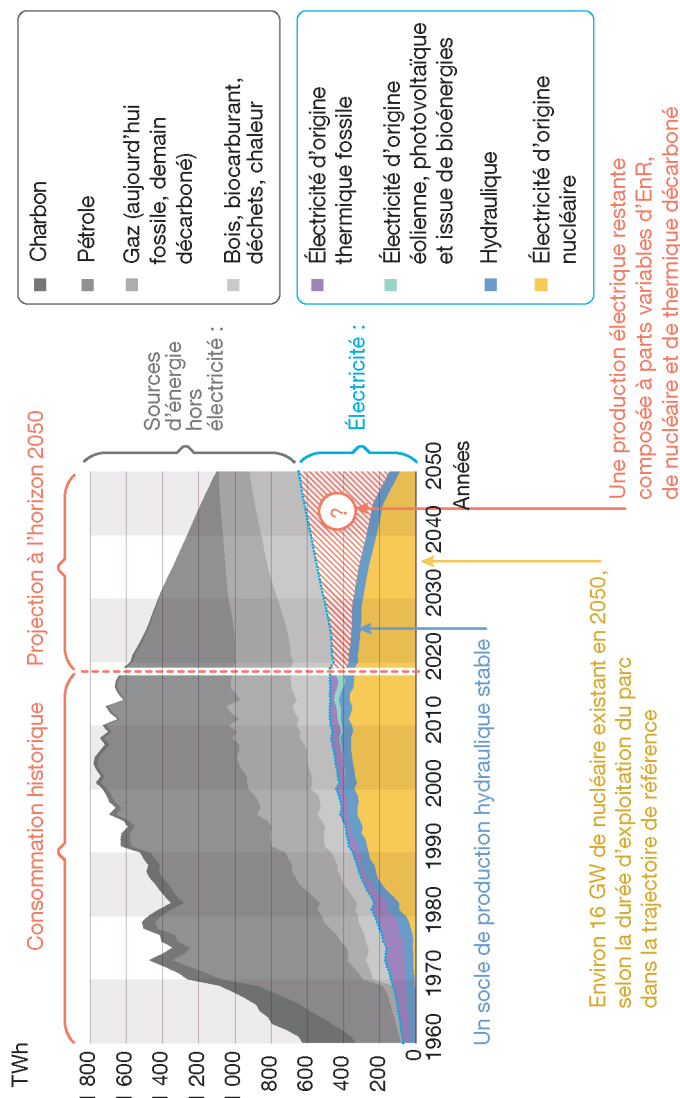
34. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-bas-carbone-snbcc>

- accroissement de l'efficacité énergétique, ce qui devrait conduire à une diminution de la demande globale en énergie ;
- développement des énergies bas carbone, ce qui inclut le nucléaire, les renouvelables (éolien, solaire, biomasse) et l'hydrogène ;
- augmentation de la consommation d'électricité.

■ Le modèle du Réseau de transport d'électricité (RTE)

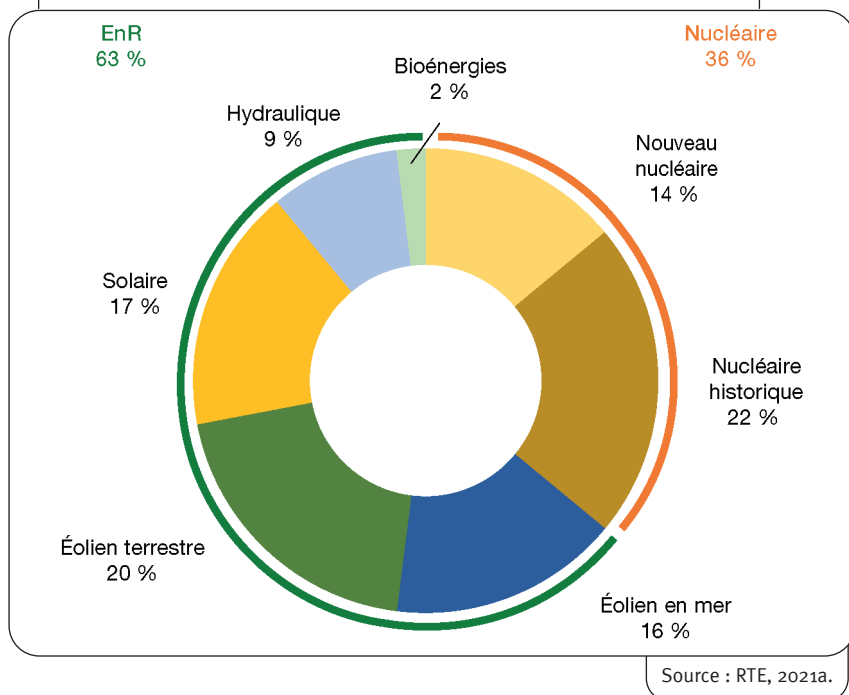
Ces tendances « lourdes » sont présentes dans le modèle RTE (figure 6.6), qui illustre la décroissance, puis la disparition du charbon et du pétrole comme sources d'énergie, la substitution du gaz naturel par un gaz d'origine décarbonée, et l'augmentation de la contribution énergétique de la biomasse. La consommation d'électricité s'accroît, tandis que les parts consacrées à l'industrie, aux transports, au chauffage des maisons et des bâtiments (énergies hors électricité) diminuent progressivement avec l'électrification. L'hydrogène est produit par électrolyse.

Plus dans le détail, le scénario RTE s'articule autour de différentes variantes ou modèles, comme le point d'interrogation de la figure 6.6 le laisse entendre. En effet, le futur énergétique de la France s'inscrit dans un contexte globalement contradictoire : disparition des énergies fossiles, diminution de la demande globale mais augmentation de la demande électrique, vieillissement du parc de réacteurs nucléaires. Pour satisfaire aux objectifs globaux de neutralité carbone en 2050, tout en assurant un approvisionnement souverain en énergie excluant des importations massives de gaz verts, de biomasse non durable ou de combustibles décarbonés comme l' H_2 , le modèle RTE considère le développement des énergies renouvelables et de l'hydrogène comme indispensable. Toutes les variantes font une place dominante (allant de 100 % à 50 %) à ce type de source d'énergie. Par contre, l'importance du « nouveau nucléaire » (construction de nouveaux réacteurs) est modulée, allant de 0 % à 50 % selon les variantes. Un exemple de répartition de la production d'énergie en 2050 selon une variante « mixte », qui prévoit le développement non seulement des énergies renouvelables et de l'hydrogène, mais aussi du nouveau nucléaire, est illustré en figure 6.7. Soulignons qu'il s'agit d'une variante parmi d'autres que le lecteur intéressé pourra consulter dans le rapport (RTE, 2021a). Les EnR totalisent 63 % de la production d'énergie, avec environ la moitié pour l'éolien et des parts importantes pour le solaire et l'hydroélectricité. La production nucléaire compte pour 36 % de la production totale, soit au même niveau que la production éolienne, et la contribution des nouveaux réacteurs y est majoritaire.

Figure 6.6. Scénario RTE de consommation de l'électricité et des autres énergies en France jusqu'à l'horizon 2050.

EnR : énergie renouvelable.
Source : RTE, 2021a.

Figure 6.7. Répartition de la production d'énergie en France en 2050 selon une variante (N2) du scénario RTE.



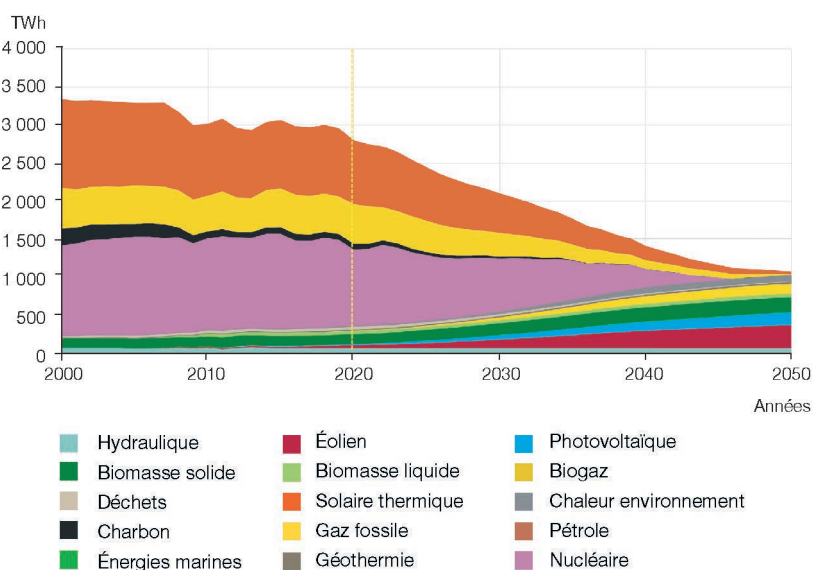
■ Le modèle négaWatt

L'association négaWatt place la transition énergétique au cœur d'une transition sociétale. La sobriété énergétique y est mise en avant, de même que l'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables et de l'hydrogène, comme dans le scénario RTE. En outre, le modèle négaWatt met l'accent sur la modération de la consommation, le recyclage, la réutilisation et la redistribution ainsi que les logiques de solidarité. Comme RTE, le scénario énergétique négaWatt se base sur la disparition des sources d'énergies fossiles et il accorde une place essentielle aux énergies renouvelables et à l'hydrogène. Par contre, il considère le nucléaire comme non soutenable par rapport aux énergies renouvelables électriques. L'éolien et le photovoltaïque sont plus rapides, plus fiables et moins coûteux à construire que les réacteurs nucléaires. Une trajectoire sans construction de nouveaux réacteurs est proposée avec une fermeture maîtrisée du parc actuel, seule à même de limiter les risques liés au fonctionnement des centrales arrivant en fin de vie, de minimiser

les problèmes associés au retraitement et au stockage des déchets radioactifs et d'économiser les coûts très élevés de construction et de maintien en fonctionnement du parc.

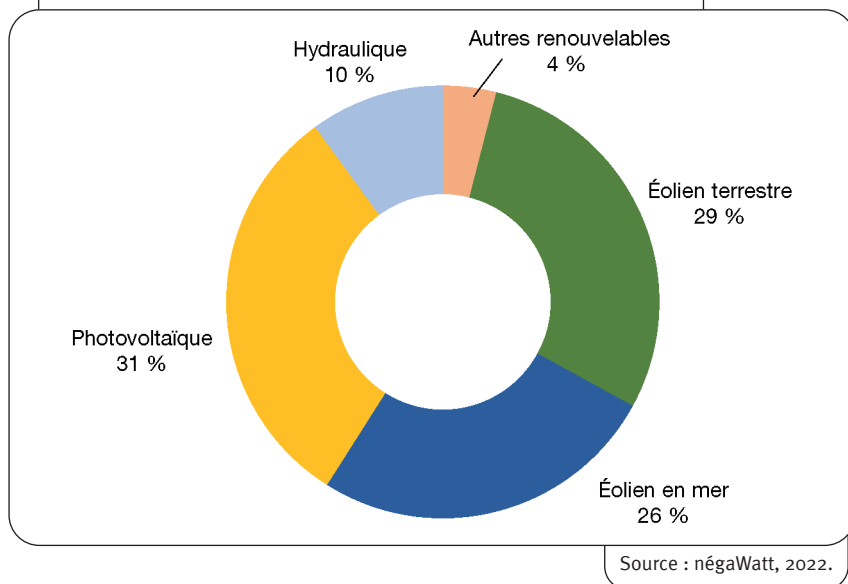
Ces priorités se retrouvent dans le scénario négaWatt (figure 6.8), lequel, comme RTE, anticipe une baisse importante de la demande et de la consommation d'énergie. La disparition du nucléaire à terme (en 2045) accompagne la fin des sources d'énergies fossiles. En 2050, l'approvisionnement énergétique est assuré par les énergies renouvelables et l'hydrogène. La répartition des sources de production attribue les rôles principaux aux bioénergies (biogaz, biomasse liquide et solide totalisant 36 %), à l'éolien (29 % au total) et au solaire (16 %, figure 6.8).

Figure 6.8. Production d'énergie en France selon le scénario négaWatt de 2000 jusqu'à l'horizon 2050.



Source : négaWatt, 2022.

Le mix électrique en 2050 (figure 6.9) est constitué principalement par les énergies éoliennes (55 % au total), suivies par le solaire (31 %) et l'énergie hydraulique (10 %). Les biosources énergétiques dominantes dans la production sont donc consommées dans d'autres secteurs que l'électricité (transports, industrie, chauffage, etc.).

Figure 6.9. Mix électrique en 2050 selon le scénario négaWatt.

Gestion de l'énergie à l'avenir : centralisée ou décentralisée ?

La transition énergétique entraîne aussi certaines modifications des comportements. Actuellement, le système électrique en France est centralisé. Il s'organise autour de trois acteurs principaux : EDF (production d'électricité), RTE (réseaux et transport) et Enedis (distribution). Ce modèle perdure et il tire parti des importantes économies d'échelle qu'il procure. L'obligation de desserte et l'homogénéité de la tarification ont permis d'établir une égalité de traitement entre tous les consommateurs. Toutefois, ce modèle centralisé est aujourd'hui remis en cause sous l'influence de plusieurs facteurs³⁵.

Le développement accéléré des énergies renouvelables entraîne une baisse de leur coût. Il est désormais possible d'imaginer une production faite au plus près des consommateurs, directement sur le toit de leur maison ou *via* des regroupements de tailles diverses (résidences, écoquartiers, communautés de communes, etc.). L'aspiration à l'autonomie énergétique serait satisfaite grâce à de nouvelles technologies de production, mais aussi de stockage, et à une adaptation des réseaux permettant aux consommateurs de gérer

35. <http://francestrategie1727.fr/actions/energie-centralisee-ou-decentralisee/>

leurs besoins énergétiques en fonction de l'offre disponible. L'électricité est concernée en premier lieu, et les sites d'autoproduction électrique (principalement d'origine solaire par panneaux photovoltaïques) se sont multipliés en dix ans³⁶, entraînant un mode de gestion beaucoup plus décentralisé de l'électricité. Cette évolution est portée par des changements de comportement privilégiant la sobriété, une croissance fondée sur les énergies propres, le recyclage et la redistribution (négaWatt, 2022). L'autoproduction et l'autoconsommation se développent avec la diminution des coûts de production, et notamment du solaire³⁷. À ces tendances générales on peut ajouter les variations brutales et les hausses récentes très importantes du prix de l'électricité d'origine centralisée, qui contribuent à éloigner le consommateur de ce mode d'approvisionnement.

Le maintien d'un système centralisé dans un contexte de multiplication des sites de production demande un déploiement accru des réseaux et leur adaptation afin d'instaurer des modes de gestion « intelligents » tirant parti au mieux des productions locales. Il peut se développer en s'appuyant sur les technologies de production actuelles fondées sur l'énergie nucléaire (figure 6.4) et sur l'émergence de grands sites de production d'énergies renouvelables (champs d'éoliennes en mer, etc.), à côté des sites de production individuels.

L'option totalement décentralisée repose sur des systèmes quasi autonomes régis par des villes, des quartiers ou des associations de citoyens *via* des boucles locales. Ce modèle implique la fermeture de la plupart des installations centralisées, en particulier les centrales nucléaires, et des investissements massifs dans des moyens de production renouvelables. Avec ce système, le réseau national a pour seule fonction de relier les boucles locales entre elles pour mutualiser la gestion du stockage ou de l'offre et de la demande. L'utilisateur doit pouvoir planifier lui-même sa consommation électrique. Enfin, les technologies de stockage de l'énergie doivent se développer pour pouvoir « lisser » les périodes de consommation et de production électriques, lesquelles, en France tout au moins, n'interviennent pas au même moment dans l'année.

L'option totalement décentralisée peut apparaître comme de nature extrême dans la situation actuelle. Elle présente toutefois l'intérêt d'identifier les verrous technologiques à surmonter (par exemple le stockage de l'énergie) pour parvenir à une gestion plus décentralisée, laquelle semble déjà être enclenchée.

36. *Le Monde*, « Avec plus de 1 million de sites de production, le système électrique français change d'échelle », A. Pécout, 29 octobre 2024, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/10/29/avec-plus-de-1-million-de-sites-de-production-le-systeme-electrique-francais-change-d-echelle_6364636_3234.html

37. *Le Monde*, « La ruée vers l'énergie solaire, grande gagnante de la bataille de la compétitivité », M. Cessac, 27 octobre 2024, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/10/27/la-ruée-vers-l-energie-solaire-grande-gagnante-de-la-bataille-de-la-competitivite_6360750_3234.html

Conclusion

La transition énergétique présente toutes les caractéristiques d'une mutation qui impacte les sociétés bien au-delà de la simple question de leur approvisionnement en énergie. Elle a été souvent comparée aux changements intervenus suite aux différents chocs pétroliers au cours des années 1970. En fait, la crise climatique et la nécessité de faire évoluer l'offre énergétique (épuisement des combustibles fossiles) impliquent la construction d'un futur fondamentalement différent de celui que nous connaissons.

L'analyse de la situation française révèle une réalité assez nuancée, bien éloignée de celle diffusée dans les médias. La production d'énergie nucléaire y est certes importante, mais la France continue d'utiliser en majorité des sources d'énergies fossiles, qu'elle importe. Ce n'est que dans le domaine de l'électricité que la prédominance du nucléaire se manifeste pleinement. À ce constat il faut ajouter les difficultés qui vont se poser dans un avenir proche avec le vieillissement des centrales. L'avenir du nucléaire en France n'est pas écrit, et ce secteur doit être considéré davantage comme un sujet à débattre que comme une solution.

L'examen des deux scénarios énergétiques futurs souligne leur homogénéité et leur cohérence, dans les hypothèses de base comme dans les conclusions. Il y a accord sur l'objectif central de décarbonation des sources d'énergie, ce qui peut sembler aller de soi dans le contexte actuel de la crise climatique. Mais les scénarios examinés aboutissent tous deux, et cela paraît plus surprenant, à la même conclusion concernant le rôle clé que les énergies renouvelables et l'hydrogène seront amenés à jouer. Le seul point de désaccord majeur entre les deux scénarios porte sur la place à accorder à l'énergie nucléaire.

Enfin, la diminution du coût des énergies renouvelables bas carbone peut pousser à remettre en cause le mode de gestion centralisé de l'énergie (électricité principalement) que nous connaissons en favorisant les tendances vers l'autoproduction et l'autoconsommation. La transition énergétique ne se traduit pas seulement par des adaptations dans les sources d'énergie, elle entraîne aussi des changements de comportement encouragés par les évolutions sociétales.

7. Les rôles de l'hydrogène dans la transition énergétique

Les chapitres précédents ont permis de dresser une carte d'identité de l'hydrogène (modes de production, place de l'hydrogène naturel, usages de l'hydrogène) valable à l'heure actuelle. Par ailleurs, les principaux objectifs de la transition énergétique ont été détaillés. Examinons maintenant le rôle que l'hydrogène pourrait jouer dans cette transition. L'utilisation de l'hydrogène pourrait-elle contribuer à faciliter cette transition ? Quels seraient les leviers que l'hydrogène pourrait mobiliser pour y parvenir ? L'objet de ce chapitre est de répondre à cette double question.

Atouts

Rappelons ici brièvement les avantages que confère l'utilisation de l'hydrogène présentés au chapitre 2. L'hydrogène est une molécule très énergétique et non toxique. Il peut être produit en grandes quantités. Son utilisation est flexible et ne génère pas de CO₂. Par contre, le transport de l'hydrogène nécessite de grands volumes sous forme gazeuse, et son seuil d'explosivité ou d'inflammabilité requiert des conditions d'utilisation strictes, mais qui ne sont toutefois pas très différentes de celles prévues pour le gaz naturel.

Dans le cadre de la transition énergétique, l'hydrogène dispose de trois grands types d'atouts. Deux sont identifiés depuis un certain temps, tandis que le troisième reste encore à confirmer. L'hydrogène est en effet reconnu comme un vecteur énergétique et comme une technologie clé pour le stockage de l'énergie. De son côté, l'hydrogène naturel pourrait constituer une nouvelle source d'énergie.

Un vecteur énergétique

L'examen du rôle de l'hydrogène demande tout d'abord d'établir une distinction claire entre les fonctions de vecteur et de source d'énergie. Leur définition fait l'objet de l'encadré 7.1. Il montre que l'hydrogène est bien un vecteur énergétique, car il peut être converti en énergie (surtout électrique) et permet donc de la transporter. Mais l'hydrogène naturel peut aussi constituer une source d'énergie, comme cela a été montré au chapitre 4. L'hydrogène cumule donc les deux fonctions. Toutefois, elles sont bien différentes l'une de l'autre et ne doivent pas être confondues. Le rôle de vecteur énergétique de l'hydrogène ne peut s'exercer qu'en mettant en œuvre des technologies de conversion entre H₂ et électricité. Quant au rôle de source d'énergie, il est réservé exclusivement à l'hydrogène naturel.

Encadré 7.1. Définitions**Vecteur énergétique**

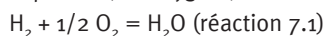
- Méthode permettant de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre pour y être transformée/utilisée.
- Exemple : l'électricité.

Source d'énergie

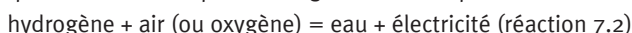
- Matériau ou phénomène pouvant produire de l'énergie.
- Exemple : le pétrole, le charbon (non renouvelables), le vent, les marées (renouvelables).

Deux types de technologies permettent la conversion de l'hydrogène en électricité, et *vice versa*. D'une part, l'énergie électrique peut servir à produire de l'hydrogène à partir de l'eau. C'est l'électrolyse, actuellement une des voies principales de synthèse de l'hydrogène, déjà évoquée au chapitre 3 et qui représente aujourd'hui la principale alternative à la production d'H₂ à partir des combustibles fossiles. Réciproquement, l'hydrogène peut servir de combustible pour produire de l'électricité. Cette opération nécessite la mise en œuvre d'une pile à combustible (PAC).

Le principe de fonctionnement d'une PAC est inverse de celui de l'électrolyse (figure 7.1). L'hydrogène est oxydé, tandis que l'air (ou l'oxygène) est réduit selon la réaction chimique :



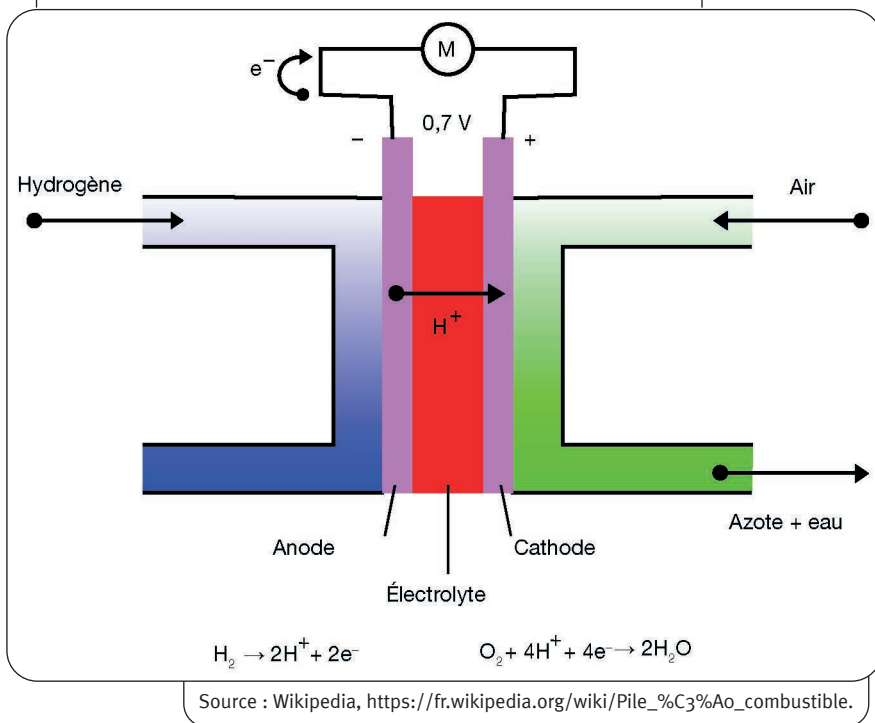
qui est la représentation d'un processus global résumé par :



Cette réaction intervient au sein d'une pile essentiellement composée de 2 électrodes — l'anode et la cathode — séparées par un électrolyte (figure 7.1). L'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) fournit 2 protons (H⁺) qui traversent l'électrolyte et 2 électrons (e⁻) qui produisent le courant électrique, et (à la cathode) réduisent l'air (utilisé comme source d'oxygène) tout en produisant de l'eau et une certaine quantité de chaleur. Les réactions peuvent se produire à température ambiante grâce à un catalyseur, généralement le platine, et à plus haute température jusqu'à environ 1 000 °C. Actuellement, différents types de PAC fonctionnent selon ce principe général. Les variantes les plus notables se situent au niveau de la température de fonctionnement, de la nature de l'électrolyte et du type d'électrodes (France Hydrogène, 2018).

La technologie des PAC s'est imposée depuis quelques décennies. Elle connaît un développement spectaculaire, et les PAC sont largement commercialisées dans divers secteurs, dont en particulier :

- le portable (téléphones, ordinateurs) ;
- le transport (véhicules légers, mais aussi véhicules plus lourds comme les bus, les navires, les avions) ;
- l'utilisation stationnaire (comme générateur d'électricité pour l'industrie ou l'usage domestique).

Figure 7.1. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Quant au combustible, l'H₂ utilisé dans les PAC est surtout de l'hydrogène gris, comme les autres types d'utilisations de l'H₂ actuels, mais un passage à de l'hydrogène bas carbone ou naturel est parfaitement envisageable. Notons que certaines applications industrielles, notamment dans les transports, emploient du gaz naturel comme combustible (d'autres partent du méthanol), ce qui demande l'adjonction d'un dispositif de reformage en amont de la pile pour obtenir l'hydrogène qui sera injecté.

Les avantages de l'emploi d'une PAC sont connus : fiabilité, fonctionnement sûr et facilité d'utilisation, flexibilité (adaptation de la taille au besoin), caractère non polluant (absence d'émission de CO₂). Les inconvénients sont les coûts, qui peuvent être importants (nature du combustible, platine utilisé comme catalyseur), mais ceux-ci pourraient toutefois diminuer avec de l'hydrogène naturel ou provenant d'énergies bas carbone. Le rendement (efficacité énergétique) d'une PAC est supérieur à celui des moteurs thermiques, mais reste inférieur à celui d'une batterie. Par rapport à cette dernière, une PAC se recharge beaucoup plus vite. L'augmentation des rendements des PAC (comme d'ailleurs de l'électrolyse) fait partie des principaux objectifs du secteur de la recherche

et du développement (voir chapitre 3, section « La recherche sur les processus de production d'hydrogène »). Soulignons enfin la différence fondamentale qui existe entre une PAC et une batterie. La seconde permet en effet de stocker l'énergie, tandis que dans la première, l'énergie est seulement convertie. Les deux technologies sont donc complémentaires, et sont d'ailleurs associées dans les solutions mixtes (PAC + batterie) envisagées pour les transports, permettant ainsi d'augmenter la durée de fonctionnement des batteries. Une PAC n'est que le moyen par lequel l'énergie apportée par hydrogène peut être rendue disponible à tout moment et partout.

■ Stockage de l'énergie

C'est le second atout majeur de l'hydrogène. L'hydrogène peut être stocké sous sa forme gazeuse comme sous sa forme liquide, ce dernier type de stockage nécessitant une opération particulière à faire subir au gaz, compression ou refroidissement (voir chapitre 2, section « Un peu de chimie » et « Propriétés de l'hydrogène »). Il peut aussi être stocké en étant immobilisé dans un solide ou combiné chimiquement dans un liquide. Stocker de l'hydrogène est équivalent à stocker de l'énergie à cause de l'équivalence de fait entre H_2 et électricité. C'est donc un aspect très important des technologies de l'hydrogène. C'est aussi un point qui peine à s'imposer dans les opinions, comme en témoignent certaines déclarations restées incontestées dans les médias sur la soi-disant impossibilité de stocker l'énergie.

L'état liquide s'impose généralement quand les quantités à stocker sont importantes (tonnes ou dizaines de tonnes), par exemple pour des applications spatiales. Le stockage à l'état gazeux sous pression est, lui, plutôt adapté aux quantités ne dépassant pas quelques kilos ou dizaines de kilos. C'est le cas par exemple pour les véhicules légers munis d'une PAC qui développent une autonomie de 600 à 700 km. Le transport, la livraison et le stockage d'hydrogène sous pression sont des pratiques courantes. Le stockage s'effectue dans des réservoirs généralement en acier sous des pressions de l'ordre de 200 bars. D'autres types de conteneurs en matériaux composites sont maintenant développés. On distingue classiquement les procédés de stockage mobile (devant équiper des véhicules fonctionnant à l'hydrogène) et ceux de stockage stationnaire (stations-service de remplissage).

Le stockage par immobilisation dans un solide ou par combinaison chimique avec un liquide se développe également surtout pour éviter les risques inhérents au stockage sous la forme de gaz comprimé. Ce type de stockage fournit aussi des avantages dans le transport. Diverses méthodes sont actuellement testées. L'adsorption de l'hydrogène sur les surfaces de certains solides comme les charbons actifs est une de ces méthodes, mais elle ne permet toutefois d'atteindre que des concentrations de quelques pour cent en masse d'hydrogène. L'hydrogène peut être aussi absorbé par combinaison chimique avec des métaux ou des alliages pour former des hydrures métalliques ou des complexes hydrogène-métal. Certains métaux (vanadium, palladium, magnésium) ou composés intermétalliques sont connus pour leur capacité à

absorber de façon réversible de grandes quantités d'hydrogène. Cette méthode est depuis longtemps une voie d'étude pour le stockage de l'hydrogène, des progrès notables ont été réalisés et sont en cours. Enfin, certains liquides, inorganiques ou organiques, concentrent dans leur structure chimique un nombre important d'atomes d'hydrogène qui peuvent être récupérés par des opérations de déstockage.

À côté de ces méthodes artificielles de stockage, le stockage en milieu naturel de l'H₂ se développe actuellement comme solution pour stocker de grandes quantités de gaz telles que celles issues de la production électrique de champs d'éoliennes en mer. Le stockage géologique de grandes quantités d'H₂ sur de longues durées permet en effet de « lisser » la production et la demande d'énergie, qui peuvent ne pas être synchrones (voir chapitre 6, section « Gestion de l'énergie à l'avenir : centralisée ou décentralisée ? »). Plusieurs types de contextes géologiques sont actuellement retenus pour le stockage de l'H₂ : les cavités salines, les gisements de pétrole ou de gaz épuisés, les couches de sel. L'hydrogène est directement injecté sous pression et son devenir dans le sous-sol est soumis à un suivi et des tests physiques et chimiques réguliers. Le gaz stocké est ensuite récupéré en tête de puits, analysé, purifié et conditionné avant d'être finalement mis en utilisation par injection dans les réseaux.

I Une source d'énergie

Nous avons vu en conclusion du chapitre 4 que l'hydrogène naturel a aujourd'hui conquis un véritable droit d'existence et qu'il peut effectivement représenter une nouvelle source d'énergie. L'hydrogène naturel représente une opportunité majeure qui apporte une dimension nouvelle aux rôles de vecteur et de stockage de l'énergie qui ont été évoqués plus haut. Toutefois, des interrogations subsistent sur les flux d'hydrogène naturel et sur la fraction récupérable et utilisable pour les besoins énergétiques. L'exploration de l'hydrogène naturel est entrée dans une phase mature, mais le nombre de sites en cours d'exploitation reste très limité. La place de l'hydrogène naturel en tant que source d'énergie future reste encore incertaine. Les années à venir seront déterminantes pour dissiper les doutes.

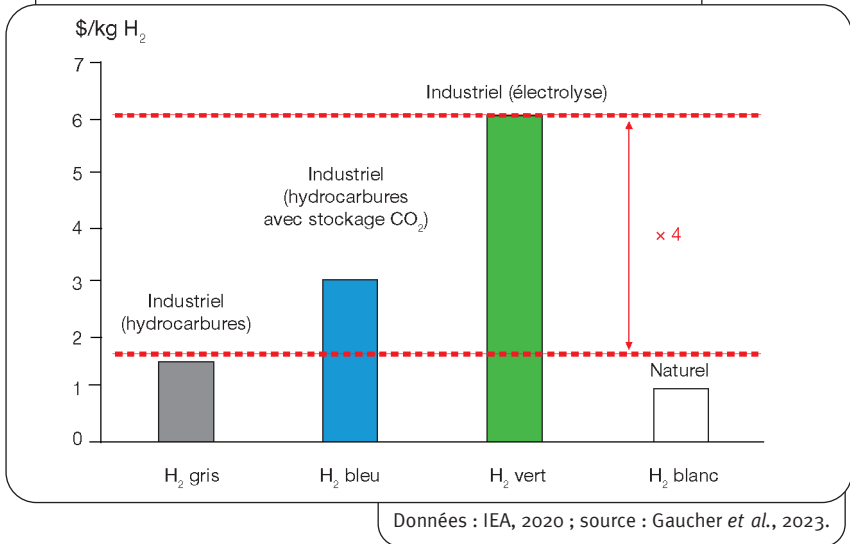
I Inconvénients et limitations

En dehors des dispositions particulières à prendre pour son emploi en toute sécurité, les principaux freins qui limitent actuellement l'utilisation de l'hydrogène sont de nature à la fois économique et technologique. En effet, les diverses voies de production d'hydrogène ne sont pas équivalentes en matière de coûts (voir chapitre 3, section « L'hydrogène produit aujourd'hui est principalement gris » et « Électrolyse et hydrogène vert »). Parmi les types d'hydrogène produits artificiellement, le gris est le moins cher, l'introduction de méthodes de séquestration du CO₂ renchérissant le coût de

l'hydrogène bleu. L'hydrogène vert (ou plus précisément bas carbone) obtenu par électrolyse est en général considéré comme beaucoup plus cher que les deux précédents.

Les coûts de production des quatre types d'hydrogène sont comparés sur la figure 7.2. Les différentes estimations fournissent des résultats globalement en accord (IEA, 2020 ; Gaucher *et al.*, 2023). Le prix est légèrement inférieur à 2 dollars par kilo d' H_2 produit pour l'hydrogène gris. Il est plus cher d'un facteur $\times 1,5$ à $\times 2$ pour l'hydrogène bleu. Le coût de production de l'hydrogène vert par électrolyse se monte à environ 6 dollars, soit un facteur $\times 4$ de différence avec l'hydrogène gris. Enfin, la récupération de l'hydrogène blanc dans le milieu naturel coûterait environ 1 dollar par kilo d' H_2 .

Figure 7.2. Coûts de production par type d'hydrogène en 2020.



Les données de la figure 7.2 sont riches d'enseignement pour comprendre la situation actuelle de l'hydrogène et envisager les évolutions futures telles qu'elles sont présentées dans les deux chapitres précédents. Elles montrent bien les verrous qui doivent être levés pour parvenir à une augmentation importante de la production et de la consommation d' H_2 dans un contexte global de disparition à terme de l'utilisation des hydrocarbures fossiles, deux objectifs qui, au vu des données, peuvent apparaître comme contradictoires. En effet, l'hydrogène gris reste, en dehors de l'hydrogène naturel, le type d' H_2 le plus économique à produire à l'heure actuelle. L'adjonction de procédés de stockage du CO_2 émis n'est pas neutre du point de vue des coûts de production (renchérissement de l'ordre de $\times 1,5$ à $\times 2$), et les doutes suscités par cette technologie (voir chapitre 3, section « L'hydrogène produit aujourd'hui est principalement gris »,

et chapitre 5, section « Production d'hydrogène ») ne sont pas de nature à voir son utilisation s'imposer rapidement. L'hydrogène produit par électrolyse est beaucoup plus coûteux à produire que l'hydrogène dérivé des hydrocarbures fossiles, la différence par rapport à l'hydrogène gris étant d'un facteur $\times 4$. On peut dire que la logique macroéconomique actuelle joue contre la production d'hydrogène vert. L'installation de l'électrolyse comme voie principale de production d' H_2 représente donc un pari qui repose, d'une part, sur une amélioration substantielle du rendement des électrolyseurs et, d'autre part, sur une diminution du prix de l'électricité, comme illustré au chapitre 8. Enfin, la possibilité de voir émerger de nouvelles voies plus économiques de production d'hydrogène, telles que celles évoquées aux chapitres 3 et 4, ne doit pas être écartée.

Un autre enseignement de la figure 7.2 est la démonstration de l'intérêt majeur de l'hydrogène naturel, qui apparaît comme le moins coûteux des quatre grands types d'hydrogène. Sa récupération dans le milieu naturel combinerait donc des avantages à la fois économiques (coûts d'exploitation bas et inférieurs à tous les procédés de production industriels, consommation d'électricité marginale) et environnementaux (non-implication des combustibles fossiles, non-émission de CO_2 , restitution de l'eau lors de son utilisation, figure 7.1). Cet état de fait justifie les attentes et légitime la mobilisation actuelle autour de l'hydrogène blanc. L' H_2 naturel peut fortement accroître le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique.

Conclusion

Le rôle joué par l'hydrogène dans la transition énergétique repose sur des certitudes, mais il soulève aussi des interrogations :

- l'hydrogène comme vecteur et agent de stockage de l'énergie sera nécessairement amené à occuper des fonctions essentielles dans les technologies et les politiques futures de l'énergie, lesquelles doivent se transformer pour espérer satisfaire les objectifs de la transition énergétique. Les technologies conditionnant ces deux fonctions de l'hydrogène (vecteur, stockage) bénéficient dans l'ensemble d'un bon niveau de maturité, ce qui devrait leur garantir une influence réelle et positive dans les évolutions futures ;
- la situation est beaucoup moins claire en ce qui concerne la production de l'hydrogène. Une contradiction de fait existe entre les objectifs d'augmentation de la production d' H_2 et de disparition des hydrocarbures fossiles. La production d'hydrogène vert à l'avenir représente un réel pari conditionné par les progrès scientifiques et certaines évolutions macroéconomiques (coût de l'électricité) ;
- enfin, l' H_2 naturel peut fortement accroître le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique, mais sa place en tant que source d'énergie future reste encore incertaine.

8. L'hydrogène : un accélérateur de nouvelles pratiques en région

Les chapitres précédents ont permis de préciser les rôles que l'hydrogène serait amené à jouer dans le cadre de la transition énergétique. Les conclusions qui en ont été tirées reposent sur une analyse globale et sur des projections à l'échelle nationale (chapitre 6), voire, pour certaines, mondiale (chapitre 5), ainsi que sur des critères de nature macroéconomique (coûts de production d'H₂, chapitre 7). Toutefois, c'est principalement au niveau local que doivent être conçues, planifiées et conduites les manifestations concrètes à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de la transition énergétique. Par exemple, le président de la République a appelé, le 25 septembre 2023, les collectivités à conduire la planification écologique au sein de leurs territoires, et les modalités de cette démarche ont été précisées au niveau ministériel³⁸. Dans ce même ordre d'idée, les régions se sont mobilisées depuis plusieurs années pour sensibiliser les milieux socio-économiques et développer les initiatives et les projets autour de l'hydrogène³⁹. Dans quelle mesure et comment les technologies de l'hydrogène sont-elles utilisées en pratique sur le plan local ? Comment contribuent-elles à faciliter les adaptations requises par la transition ? Pour répondre à cette double question, il est nécessaire d'examiner la situation à plus petite échelle. C'est l'objet de ce chapitre, qui se focalise sur la Bretagne, prise comme exemple de collectivité géographiquement, économiquement et culturellement cohérente exposée à et réagissant aux opportunités qu'offrent les pratiques de l'hydrogène.

Des exemples de l'actualité témoignant de l'intérêt autour de l'hydrogène en Bretagne ont été illustrés au chapitre 1. L'information régulière du grand public sur les développements en cours, l'émergence de projets industriels, la prise en considération de l'hydrogène dans les collectivités et les politiques publiques, mais aussi l'apparition de structures de formations dédiées et certains événements médiatiques sont quelques-unes des manifestations qui démontrent l'implantation de la thématique au niveau local et régional⁴⁰. Par ailleurs, la feuille de route sur l'hydrogène adoptée par le conseil régional⁴¹ témoigne de la volonté des instances régionales de se mobiliser sur cette question. Dans ce contexte d'ensemble favorable, les caractéristiques propres à la Bretagne, parmi lesquelles la situation énergétique, les activités

38. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/transition-ecologique-territoires>

39. <https://paris.hvolution.com/fr> ; <https://hydrogene-renouvelable.bzh>

40. <https://hydrogene-renouvelable.bzh/agenda/brittany-day-22-septembre/> ; <https://hydrogene-renouvelable.bzh/wp-content/uploads/2024/04/Journee-Recherche-H2-Programme-previsionnel.pdf>

41. <https://www.bretagne.bzh/aides/fiches/hydrogene-renouvelable-maillage-des-territoires-bretons>

économiques, le milieu naturel et les investissements publics et industriels, vont avoir un rôle déterminant dans la structuration des filières et l'émergence d'opportunités de développement de la thématique hydrogène. Ce chapitre synthétise les principaux projets en cours, souligne le potentiel de nouvelles initiatives autour de l'hydrogène et discute les perspectives, notamment sociétales, associées à son développement sur le plan régional. Son contenu bénéficie largement du remarquable travail d'animation et d'inventaire des projets sur l'hydrogène réalisé sous l'impulsion du conseil régional (BDI, 2021).

Production d'hydrogène

Au vu de la relation étroite entre production d'hydrogène, sources d'énergie et prix de l'électricité qui ressort des chapitres précédents, il est nécessaire d'examiner tout d'abord la situation énergétique de la Bretagne.

La situation locale de l'énergie

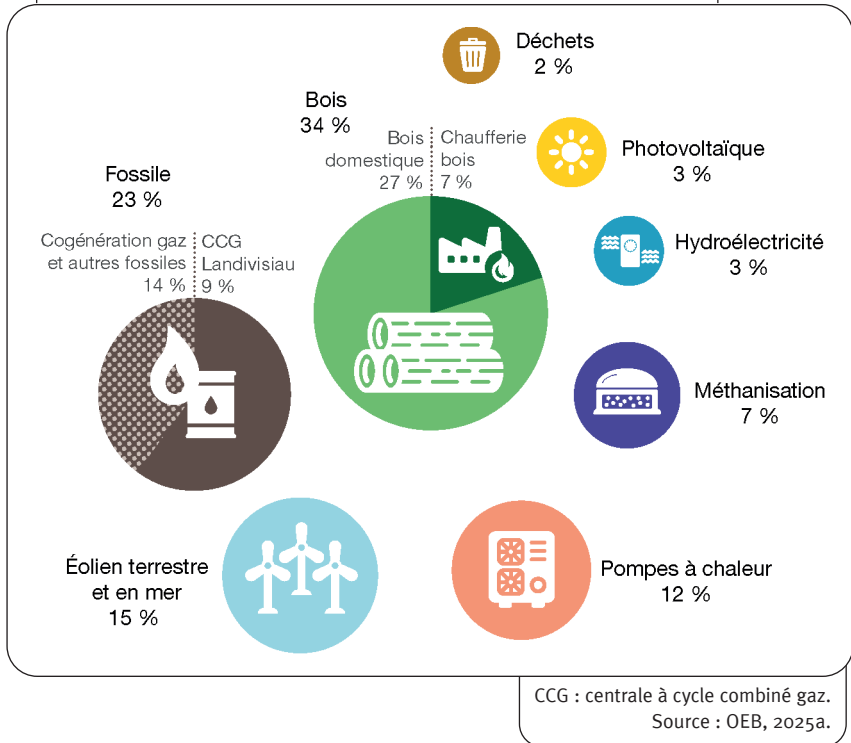
Parmi les régions françaises, la Bretagne a longtemps fait figure de parent pauvre pour la production d'énergie. Aucune centrale nucléaire n'y est par exemple implantée et la région doit importer une grande partie de son énergie. En 2000, à l'exception de l'usine marémotrice de la Rance, la Bretagne était un territoire quasiment vierge de toute production d'énergie. Elle a développé depuis non seulement des ressources renouvelables et des ressources de récupération valorisant les déchets, mais aussi certaines ressources fossiles pour produire son énergie (figure 8.1).

Selon l'Observatoire de l'environnement en Bretagne (OEB, 2025a), la production d'énergie a doublé entre 2012 et 2023, cette augmentation reposant essentiellement sur le fort développement des énergies renouvelables qui, en 2023, fournissaient globalement 76 % de la production régionale d'énergie si l'on inclut la contribution des pompes à chaleur. Toutefois, la production locale ne couvre encore qu'une faible part de la consommation totale (22 % en 2023). Les filières avec la plus forte croissance au cours des vingt dernières années sont l'éolien, le solaire, le biogaz (méthanisation) et les chaufferies au bois. L'augmentation de la part des énergies fossiles est principalement due au démarrage de la centrale à gaz de Landivisiau (voir ci-dessous) et à la cogénération gaz. Le bois (usage domestique et chaufferies cumulés) fournit à lui seul environ la moitié de la production d'énergie hors fossiles (figure 8.1), avec une contribution très stable depuis 2005 (OEB, 2017 ; 2023 ; 2025).

Environ 40 % de l'énergie totale disponible est utilisée sous forme d'électricité, dont la production a augmenté de 21 % en Bretagne entre 2018 et 2021, une augmentation qui suit globalement celle de l'énergie (OEB, 2023). Cette évolution est le résultat du développement principalement de l'éolien et du solaire, les bioénergies (biogaz)

ainsi que l'hydroélectricité étant aussi en augmentation (figure 8.2). En 2024, l'électricité produite en Bretagne était à 51 % d'origine éolienne. La part des ressources thermiques fossiles était encore assez importante (24 %), mais au total les renouvelables dominaient largement (76 % de la production régionale d'électricité).

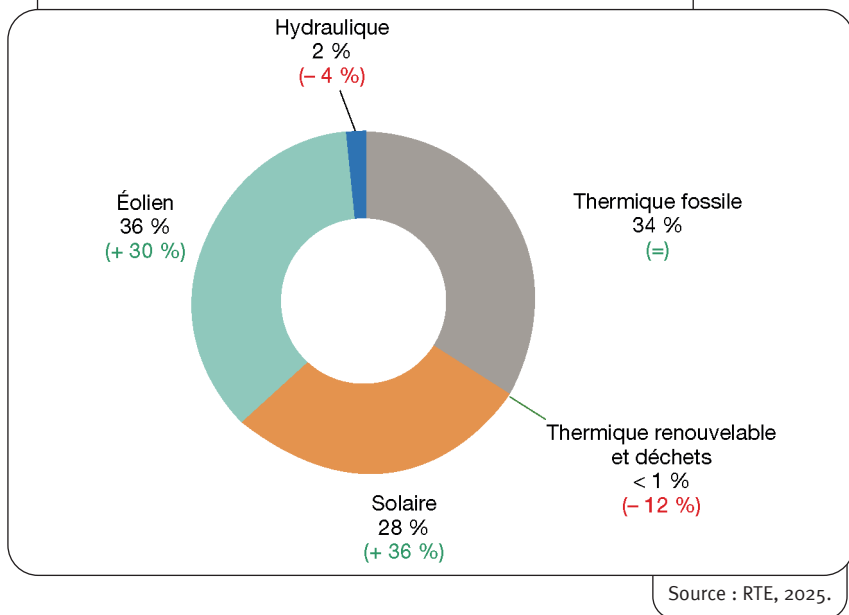
Figure 8.1. Production d'énergie par filière en Bretagne en 2023.



Selon l'Observatoire de l'environnement en Bretagne (OEB, 2025b), en 2024, 42 % de l'énergie consommée en Bretagne proviennent de produits pétroliers. Ce schéma de consommation, assez stable depuis 2018, souligne l'importance des combustibles fossiles. La situation est donc, pour la consommation, différente et beaucoup moins vertueuse que pour la production. Les produits pétroliers sont essentiellement destinés aux transports routiers, maritimes et aériens. L'électricité est utilisée à parts égales dans le résidentiel/tertiaire et l'industrie. Le gaz naturel est destiné au chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires, mais aussi à l'industrie et, en moindre proportion, à l'agriculture. Le bâti résidentiel et le tertiaire représentent 41 % de la

consommation en 2024, à quasi-égalité avec le transport (34 %), le reste (autour de 24 %) se répartissant entre l'industrie (13 %), l'agriculture et la pêche (11 %).

Figure 8.2. Répartition par filière de la production d'électricité en Bretagne en 2024 et évolution par rapport à 2023.



I Tendances et projets

Les ressources énergétiques fossiles, bien que minoritaires dans le mix énergétique régional, ont progressé depuis 2012 (cogénération à partir de gaz naturel, turbines et groupes produisant de l'électricité à partir de fioul ou de diesel ; OEB, 2017 ; 2023 ; 2025). Mais l'installation puis le fonctionnement depuis 2021 de la centrale à gaz de Landivisiau⁴² (la décision de construction remontant à 2011) ont modifié la répartition régionale entre les différentes sources d'énergie. Disposant d'une importante capacité de production électrique, de même niveau que celle du parc éolien de Saint-Brieuc, la centrale de Landivisiau a fourni, en 2023, 9 % de la consommation totale d'électricité de la région. La production d'énergie provenant de sources renouvelables a été ramenée à 76 % (contre 88 % en 2012, figure 8.1). En parallèle, la part

42. https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A0_cycle_combin%C3%A9_gaz_de_Landivisiau

de la consommation régionale d'énergie couverte localement est restée globalement stable, à 22 % en 2023 (pour 23 % en 2022).

Les investissements industriels et publics au cours des vingt dernières années ont permis le développement des énergies renouvelables en Bretagne, en particulier l'éolien et la biomasse (chaufferies bois), mais aussi le biogaz (produit par méthanisation). La croissance du solaire photovoltaïque est constante mais plus modérée (OEB, 2017 ; 2023 ; 2025). Une des caractéristiques notables du domaine des renouvelables est le développement d'une démarche individuelle de production. D'une part, les sources d'énergie d'origine domestique (bois de chauffage et pompes à chaleur cumulés) dépassent les autres sources renouvelables (figure 8.1). D'autre part, les projets de production « citoyens » (le terme est emprunté au site concerné ; OEB, 2023) sont actuellement en plein essor (voir aussi chapitre 6, « Gestion de l'énergie à l'avenir : centralisée ou décentralisée ? »). Ils portent principalement sur le solaire (installation de panneaux photovoltaïques au sol et sur toiture), mais aussi l'éolien et la méthanisation (OEB, 2023 ; 2025).

Figure 8.3. Groupe d'éoliennes, parc de Saint-Brieuc.



Source : © N. Bot-Jaffray⁴³.

43. *La Presse d'Armor*, « Éoliennes de la baie de Saint-Brieuc : 10 photos du parc en pleine mer », N. Bot-Jaffray, 9 septembre 2023, https://actu.fr/bretagne/paimpol_22162/eoliennes-de-la-baie-de-saint-brieuc-10-photos-du-parc-en-pleine-mer_60o618o6.html

Une autre caractéristique du secteur des renouvelables en Bretagne est l'existence de grands projets d'équipement. Deux concernent la construction de parcs éoliens en mer, la production éolienne ayant été jusqu'à récemment concentrée uniquement sur l'éolien terrestre. Le premier, celui de la baie de Saint-Brieuc, est raccordé au réseau depuis juillet 2023 après une phase de préparation d'une dizaine d'années⁴⁴ (figure 8.3). Le second projet, en Bretagne Sud, comprend deux étapes. La première verrait l'installation d'une dizaine d'appareils pour une mise en service vers 2031⁴⁵. Un maître d'œuvre a déjà été sélectionné (mai 2024). La seconde étape fait actuellement l'objet d'un appel d'offres (lancé en juillet 2024) pour une mise en service en 2034. Le parc de Saint-Brieuc a une capacité de production de 1,8 TWh et celui de Bretagne Sud de 2,8 TWh (au total), à comparer avec une production de l'ensemble de la filière éolienne de 2,2 TWh en 2020 (figure 8.2). Lorsqu'ils seront en fonctionnement, ces deux parcs feront plus que doubler la capacité de production électrique d'origine éolienne. La dépendance énergétique de la Bretagne devrait donc diminuer à l'avenir, surtout si on y rajoute la production de la centrale à gaz de Landivisiau.

■ Vers une filière locale de production d'hydrogène vert

Le secteur de l'énergie en Bretagne se signale par :

- une augmentation de sa capacité de production, notamment en ce qui concerne l'électricité ;
- des sources d'énergie très majoritairement d'origine renouvelable, les projets (champs d'éoliennes en mer) devant encore accentuer cette tendance ;
- le développement d'initiatives de production citoyennes basées sur les énergies renouvelables.

Dans cet ensemble et aussi dans le contexte global de disparition annoncée des énergies fossiles, la centrale à gaz de Landivisiau peut apparaître comme une anomalie. Rappelons qu'elle résulte d'une décision prise en 2010 (dans le cadre du pacte électrique breton) dans le but de remédier à la fragilité énergétique de la région. Quoi qu'il en soit, l'évolution du secteur de l'énergie en Bretagne préfigure la situation préconisée dans les scénarios énergétiques du futur (sources d'énergie décarbonée, augmentation de la part de l'électricité, gestion décentralisée de l'énergie, voir chapitre 6, section « Les scénarios énergétiques du futur »).

Cette évolution satisfait donc à certains objectifs majeurs de la transition énergétique. Elle permet aussi la montée en puissance d'une filière de production d'hydrogène vert en Bretagne. Cette filière comprend plusieurs étapes : source d'énergie, production d'électricité, conversion (principalement par électrolyse), production d'hydrogène,

44. <https://www.eoliennesenmer.fr/facades-maritimes-en-france/facade-nord-atlantique-manche-ouest/saint-brieuc> ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Parc_%C3%A9olien_en_baie_de_Saint-Brieuc

45. <https://eolbretsud.debatpublic.fr/index.html>

les projets en cours ayant démontré son bon niveau de maturité. La société Lhyfe⁴⁶ évoquée au chapitre 1 a joué un rôle pionnier dans la production d'hydrogène vert à l'échelle industrielle à partir de l'énergie éolienne. Elle s'étend maintenant sur plusieurs sites et à l'international, mais repose économiquement sur la fourniture locale, et donc à relativement bon marché, d'une source d'énergie renouvelable (éolien surtout) susceptible de minimiser le coût de l'électricité, et donc de l'électrolyse (voir chapitre 3, section « Electrolyse et hydrogène vert », et chapitre 7, « Inconvénients et limitations »). Notons toutefois que l'énergie nécessaire à la production d'H₂ vert en Bretagne n'est pas uniquement d'origine éolienne (BDI, 2021). Le solaire est aussi impliqué, ou des combinaisons associant le solaire et les bioénergies (déchets « verts » traités par méthanisation, projet ESTI⁴⁷). Enfin, l'électricité provenant du traitement des ordures ménagères peut aussi être utilisée pour produire de l'H₂ (projet Sidepaq⁴⁸).

Les différents projets de production d'H₂ illustrent l'omniprésence de l'électrolyse dans la conversion énergie/électricité-hydrogène. Cette technologie est utilisée de façon systématique dans des projets variés, allant du démonstrateur à des activités de recherche et de développement (BDI, 2021). Mentionnons les recherches concernant l'installation d'électrolyseurs en mer au voisinage des champs d'éoliennes (alimentation en H₂ des façades maritimes), la mise au point de nouveaux types d'électrolyseurs et l'amélioration des performances des appareils actuels (voir aussi chapitre 3, « La recherche sur les processus de production d'hydrogène »). Toutefois, la production d'H₂ hors électrolyse est aussi envisagée, comme dans le projet GRHyN⁴⁹, où elle serait assurée directement par bioproduction à l'aide de micro-organismes marins (voir chapitre 3, section « Autres méthodes »).

Les débouchés et applications de l'hydrogène

Celles-ci sont fortement orientées par les types d'activités. En dehors du tourisme, on sait que l'économie régionale est tournée vers l'agriculture et les industries agroalimentaires, et vers les activités côtières, portuaires et maritimes. La Bretagne est également présente dans les secteurs du numérique, des biotechnologies et de la santé⁵⁰. Ce dynamisme économique se retrouve dans les projets actuellement en cours.

Le secteur maritime

C'est un des secteurs d'activités qui peut potentiellement bénéficier des applications de l'hydrogène. Des débouchés très importants existent dans le transport maritime

46. <https://fr.lhyfe.com>

47. <https://hydrogene-renouvelable.bzh/campus-e-s-p-r-i-t-redon-developpe-ecosysteme-hydrogene>

48. <https://www.sidepaq.bzh>

49. <https://hydrogene-renouvelable.bzh/grhyn-puiser-hydrogene-inspirant-fonds-marins>

50. <https://www.cci.fr/ressources/informations-economiques/presentation-economique-des-regions/bretagne>

(navires, dragues et barges, figure 8.4), avec de nombreux projets autour de l'adaptation des moteurs classiques (gazole) et leur remplacement à terme par des motorisations hybrides ou électriques impliquant l'hydrogène (BDI, 2021). Ces évolutions demandent l'installation de nouvelles infrastructures portuaires (distribution d' H_2 à quai, interfaçage avec les activités *offshore*, services logistiques). Cet aspect fait l'objet de projets qui sont, pour certains, portés au niveau européen. D'autres prévoient de tester de nouveaux carburants décarbonés dérivés de l' H_2 , comme l'ammoniac et le méthanol⁵¹ (voir chapitre 5), mais aussi d'utiliser certaines sources d'énergies marines (hydrolien) pour produire de l' H_2 par électrolyse. Enfin, les activités portuaires (chargement-déchargement, transport, levage) sont directement concernées par les applications de l'hydrogène. On voit donc se développer autour des activités de la mer un écosystème cohérent depuis la production d' H_2 (*offshore*), sa distribution et son utilisation.

Figure 8.4. Bateau à propulsion hydrogène pour navigation dans le golfe du Morbihan, projet de navette de l'île d'Arz.



Source : BDI, 2021 ; L. Leclerc © L2Onaval.

En comparaison, le volet recherche sur ce thème pourrait sûrement être davantage étoffé. À côté d'aspects appliqués sur la production *offshore* d'hydrogène⁵², l'élaboration d' H_2 à partir des organismes marins (notamment à partir des algues, voir chapitre 3, section « Autres méthodes ») n'est que peu présente dans les projets en cours (BDI, 2021), alors que c'est un thème soutenu au niveau régional et qui pourrait bénéficier des synergies existant sur place entre les sciences de l'environnement marin, la biologie marine et les biotechnologies. Dans le même ordre d'idée, des projets de

51. <https://www.interregnorthsea.eu/redii-ports>

52. <https://www.france-energies-marines.org/projets/opharm2>

recherche sur les procédés de production d' H_2 géo-inspirés (calqués sur les processus naturels) pourraient facilement s'intégrer, vu l'expertise locale (à l'Ifremer) sur les sources hydrothermales océaniques (voir chapitre 4, « Procédés de production d' H_2 géo-inspirés »), les émissions d' H_2 et la biologie particulière qui leur sont associées. Le potentiel de découverte de nouveaux procédés de production d' H_2 décarboné n'est nullement épuisé, et c'est un domaine dans lequel les spécificités scientifiques locales pourraient sûrement davantage s'exprimer.

■ L'agriculture

Le secteur de l'agriculture est impliqué à double titre dans les applications de l'hydrogène. D'une part, il intervient dans les technologies de production d' H_2 et, d'autre part, c'est un secteur demandeur des utilisations de l' H_2 . En ce qui concerne la production d' H_2 , la biomasse, comme les autres matériaux hydrocarbonés, représente une source potentielle d' H_2 . En Bretagne, les bioénergies prises collectivement (en additionnant le bois, domestique et chaufferies, et le biogaz) sont majoritaires au sein des énergies renouvelables (figure 8.1). Parmi celles-ci, la production de biogaz par méthanisation de déchets d'origine agricole, initiée en 2015, est actuellement en plein essor et connaît une forte croissance, avec une augmentation de la production annuelle de l'ordre de 26 % sur la période 2012-2023 (OEB, 2025a). Le biogaz sert à produire de l'électricité ou de la chaleur. Sa purification fournit du biométhane qui peut aussi être directement injecté dans le réseau de distribution de gaz. Mais il est aussi possible de l'exploiter pour produire de l' H_2 par une méthode de vaporeformage voisine de celle mise en œuvre pour les combustibles fossiles.

Cette voie d'obtention de l' H_2 est encore peu explorée en Bretagne. Parmi les projets en cours, la méthanisation est effectivement employée pour traiter les déchets verts, par exemple dans le projet ESTI. Toutefois, le biogaz qui en résulte est ensuite converti (par cogénération) en énergie électrique et thermique. C'est cette électricité (complétée de celle provenant d'une ombrière photovoltaïque) qui, par électrolyse, produit l' H_2 . Malgré le potentiel que représente le nombre élevé de méthaniseurs en Bretagne (environ 200), la perspective d'une production d' H_2 à partir des déchets agricoles reste incertaine. En effet, la demande toujours croissante et l'intérêt pour le biométhane devraient limiter son utilisation comme intermédiaire dans l'obtention de l' H_2 . Par exemple, le biométhane est très utilisé pour produire de l'électricité (figure 8.2), et il intervient aussi dans des filières bien structurées en Bretagne, comme la production légumière sous serre (par cogénération). Sa conversion, même partielle, en H_2 reste toutefois envisageable, et pourrait servir à améliorer le bilan énergétique des méthaniseurs (autoproduction d'électricité par PAC), mais l'emploi généralisé de biométhane pour produire de l' H_2 vert ne semble pas être d'actualité. Notons aussi que l'agriculture peut produire de l' H_2 indépendamment du biogaz. Le projet ECO H_2 Breizh (BDI, 2021) envisage la construction d'une usine de production

d'hydrogène vert à partir d'une source d'énergie d'origine agrivoltaïque (provenant de panneaux solaires installés sur l'exploitation, figure 8.5).

Figure 8.5. Installation de panneaux solaires au sol dans le cadre d'un projet d'agrivoltaïsme.



Source : © EzumelImages / iStock.

■ Les déchets

Le traitement des déchets tels que les ordures ménagères et industrielles présente des analogies avec les déchets d'origine agricole. C'est un autre secteur encore relativement peu valorisé pour la production d' H_2 (BDI, 2021), malgré un potentiel de développement qui semble important si l'on en juge par les prototypes évoqués au chapitre 3 (section « Production d'hydrogène à partir de la biomasse »). En Bretagne, la majorité des incinérateurs de déchets ménagers valorisent l'énergie libérée sous forme de chaleur et/ou d'électricité. Cette électricité pourrait être utilisée pour produire de l' H_2 par électrolyse, comme le propose le projet Sidepaq. Le traitement des déchets agroalimentaires fait l'objet d'autres projets (GRHyN) basés sur des technologies de bioproduction d' H_2 .

En tant que secteur intéressé par les applications de l' H_2 , il faut tout d'abord rappeler l'emploi intensif qui est fait des engrais dans l'agriculture. Or la fabrication

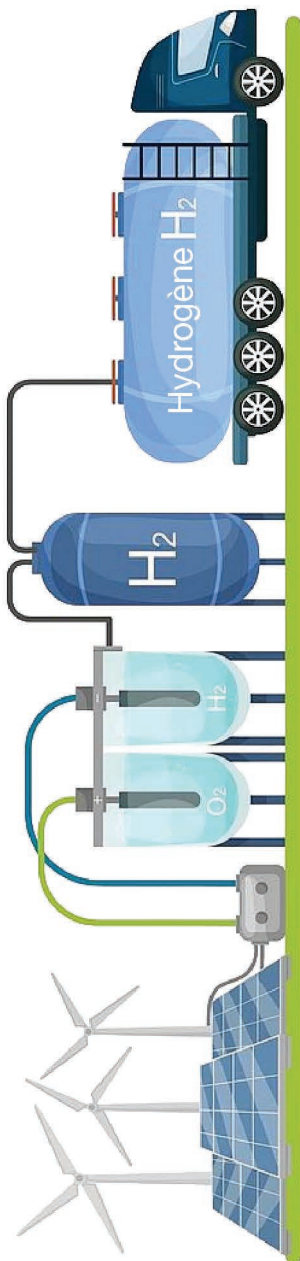
des engrais représente actuellement un des principaux débouchés de l' H_2 (voir chapitre 5). Des filières de production d'engrais décarbonés sont donc envisageables, à condition d'utiliser de l'hydrogène vert. Toutefois, leur émergence va dépendre étroitement de l'évolution des technologies de production d' H_2 , notamment des progrès autour de l'électrolyse (voir chapitres 3 et 6). À l'heure actuelle, les coûts respectifs de production de l'hydrogène gris et vert (figure 7.2, chapitre 7) jouent contre la production à grande échelle d'engrais verts, mais la situation pourrait évoluer rapidement (voir les projections au chapitre 5).

Ensuite, les technologies de l'hydrogène peuvent trouver des applications dans la motorisation des véhicules et des machines agricoles et dans l'approvisionnement en énergie des exploitations. La mobilité « lourde » (bus, camions, etc.) représente un domaine d'application important de l'hydrogène dans le futur (voir chapitre 5). Les véhicules agricoles en font partie, et les premiers tracteurs à hydrogène sont actuellement mis au point avec des principes de fonctionnement qui sont les mêmes que pour les autres véhicules de même type et de même taille (combinaisons réservoir H_2 , PAC, moteur électrique et batterie). De même, les exploitations agricoles poursuivent des objectifs d'amélioration de leur autonomie énergétique et de décarbonation de leurs sources d'énergie. Elles représentent un parc d'utilisateurs potentiels des solutions de production, de stockage et de conversion de l' H_2 actuellement développées pour les petites industries, les bâtiments urbains et les maisons individuelles. Globalement, les besoins de l'agriculture autour des technologies de l'hydrogène rejoignent donc ceux qui s'expriment dans les autres secteurs d'activités.

■ Autres domaines d'application

L'émergence de boucles énergétiques locales autour de l'hydrogène bénéficie de la capacité qui existe en Bretagne de produire de l' H_2 vert. Plusieurs de ces boucles sont déjà structurées autour de métropoles régionales, et d'autres sont à l'étude (BDI, 2021). Autour d'un site de production d'énergie et d'hydrogène, l'installation d'infrastructures dédiées, l'établissement de réseaux locaux de distribution d' H_2 , le développement des utilisations (particuliers, collectivités, entreprises) et leur optimisation avec des innovations et des investissements préfigurent un type de gestion de l'énergie décentralisé, tel qu'il a été évoqué au chapitre 6, et dans lequel les technologies de l'hydrogène jouent un rôle central. Le projet Armor Hydrogène (agglomération de Saint-Brieuc et ses partenaires, BDI 2021) se situe dans cette démarche d'une production locale de l' H_2 ouvrant la voie à un usage partagé dans la communauté des utilisateurs. Il mise sur le champ d'éoliennes de la baie de Saint-Brieuc pour l'énergie, et sur l'eau de pluie et l'électrolyse pour produire l'hydrogène (figure 8.6). Le projet envisage la création d'une usine de production d' H_2 vert et d'une station de distribution, avec une utilisation de l'hydrogène en priorité pour le transport urbain « lourd » (bus, bennes à ordures) et, dans un deuxième temps, pour les autres besoins locaux (ports, bateaux de pêche).

Figure 8.6. Schéma de principe d'une boucle énergétique locale, le projet Armor Hydrogène, Saint-Brieuc.



Source : BDI, 2021.

Le fonctionnement des boucles énergétiques locales passe par le développement des infrastructures de distribution. Par exemple, l'installation de stations ou de mini-stations de distribution d'H₂ fixes ou mobiles permet l'alimentation des différents véhicules (camions, voitures, deux-roues). La mise au point de nouveaux types de réservoirs d'H₂ accroît les capacités de stockage, conduit à une répartition plus large de la ressource et favorise la diversification des usages (transports, électricité, autres).

Ces dispositions stimulent les usages variés de l'hydrogène qui se font jour en Bretagne (BDI, 2021). Par exemple, citons la création d'unités (*hubs*) de distribution flexibles et modulables de l'électricité (mobiles et fixes) alimentées à l'hydrogène. Ces unités valorisent le rôle de vecteur énergétique de l'H₂, la technologie des PAC faisant aussi l'objet de projets de recherche et de développement. Leurs applications vont de l'alimentation énergétique de sites agricoles ou industriels à la fourniture temporaire d'énergie et à la recharge rapide de véhicules électriques.

Par ailleurs, la construction de nouveaux types de moteurs à combustion interne témoigne de l'intérêt porté aux applications de l'H₂ dans le domaine des transports. Pour le chauffage des bâtiments, des brûleurs fonctionnant à l'hydrogène sont déjà opérationnels. Notons aussi l'arrivée de systèmes intégrés d'utilisation de l'H₂ associant production, stockage et conversion/restitution de l'énergie (figure 8.7). Ces systèmes sont conçus pour pouvoir fonctionner à différentes échelles de taille, allant du résidentiel/tertiaire à l'industriel ou l'exploitation agricole. Le développement de l'autoproduction et de l'autoconsommation, avec le solaire comme source d'énergie, devrait accroître les besoins dans le stockage et la conversion de l'énergie, deux domaines pour lesquels les technologies de l'hydrogène sont centrales (voir chapitre 7) et qui présentent de réelles perspectives de développement (société H2Gremm⁵³).

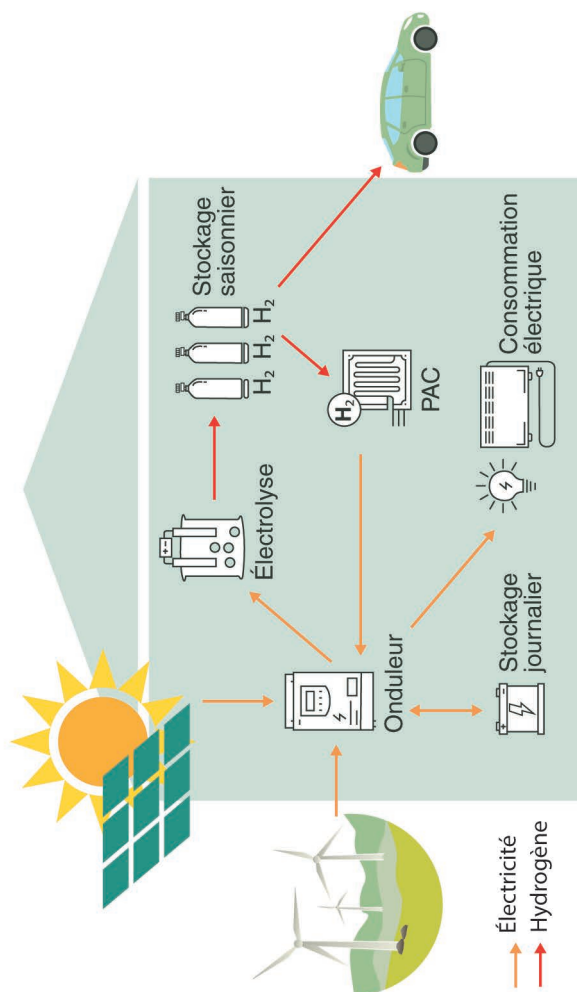
La Bretagne est la première région française dans l'agroalimentaire, et les industries de ce secteur représentent 41 % de l'emploi industriel⁵⁴. La production (viande bovine, porcs, volailles, etc.) est assurée par les exploitations agricoles, pour lesquelles l'autonomie énergétique est une nécessité, les renouvelables (solaire et méthanisation principalement) représentant des solutions pour limiter les charges. L'autoconsommation et une gestion en circuit court de l'énergie sont privilégiées par les exploitants⁵⁵, des tendances que les technologies de l'hydrogène peuvent aider à concrétiser. En parallèle, les entreprises qui assurent la transformation en produits alimentaires ont dû faire face récemment à une hausse conséquente des

53. <https://www.h2gremm.com>

54. <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/chercheur-etudiant/chiffres-cles-de-lagriculture-bretonne/les-marches-agricoles-en-bretagne/les-iaa-en-bretagne>

55. <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/detail-presta/conseil-photovoltaïque>

Figure 8.7. Concept d'économie intégrée de l'hydrogène comprenant la production par électrolyse à partir d'électricité d'origine solaire ou éolienne, le stockage saisonnier et la conversion-restitution pour une utilisation domestique ou dans des petits bâtiments industriels ou agricoles.



D'après le projet H2Gremm, <https://www.h2gremm.com>.

coûts de l'énergie⁵⁶. L'énergie (sources, approvisionnement, coût) est donc un sujet essentiel pour l'ensemble de la filière agroalimentaire.

Comme toute l'industrie bretonne, ce secteur doit donc s'adapter aux fluctuations macroéconomiques, tout en poursuivant des objectifs généraux de décarbonation, dans les sources d'énergie comme dans les modes d'utilisation. L'agroalimentaire est donc nécessairement attentif aux développements autour de l'hydrogène et en constitue un domaine d'application important par son poids dans l'industrie bretonne.

L'hydrogène naturel en Bretagne

L'hydrogène naturel représente une opportunité majeure en tant que nouvelle source d'énergie. La Bretagne dispose d'un réel potentiel dans ce domaine, comme le montrent les campagnes d'exploration conduites récemment et qui sont en cours (relatées par *Le Télégramme*⁵⁷ ; voir chapitre 4, section « Exploration de l'hydrogène naturel : premier bilan et exemples »). Toutefois, le rôle futur de l'hydrogène naturel reste encore incertain, et son évaluation, dans le cas de la Bretagne, doit nécessairement s'appuyer sur les caractéristiques géologiques locales et régionales. Celles-ci sont rappelées ci-dessous.

La géologie régionale

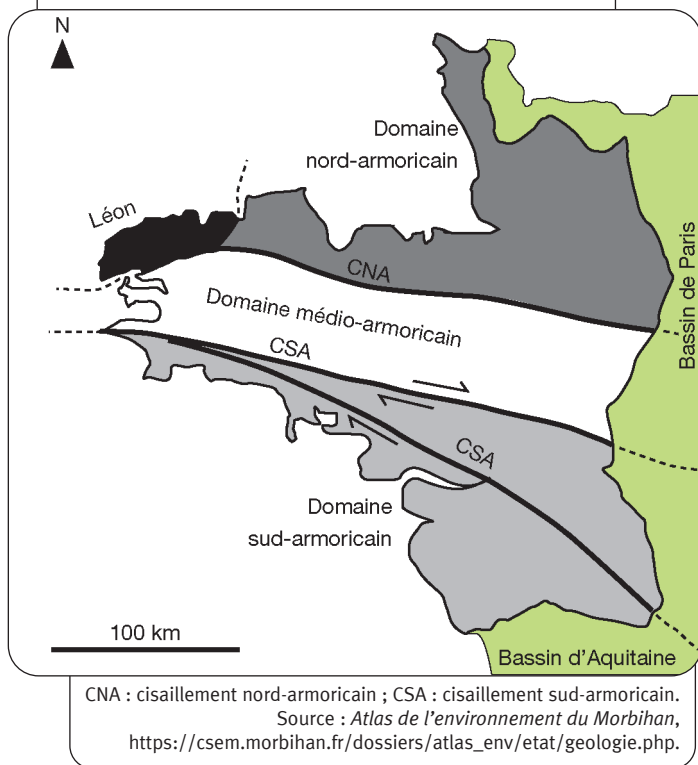
Le Massif armoricain (qui inclut la Bretagne) est compartimenté en quatre grands domaines géologiques : nord-armoricain, médio-armoricain, sud-armoricain et Léon (figure 8.8). Ces différents blocs crustaux sont séparés par de grandes failles de cisaillement de direction globalement est-ouest : au nord le cisaillement nord-armoricain (CNA) et, plus au sud, le cisaillement sud-armoricain (CSA) avec ses deux branches distinctes. Le Léon se comporte comme un bloc étranger accolé aux trois autres le long de l'Élorn.

La Bretagne comprend des terrains principalement structurés au cours de deux événements géologiques majeurs : les orogénèses cadomienne (âges compris entre environ 550 et 700 millions d'années) et hercynienne (âges compris entre environ 300 et 370 millions d'années). Elle est donc constituée de terrains anciens (la plupart ont des âges entre 300 et 500 millions d'années) et contient même quelques reliques de roches très anciennes (certaines jusqu'à 2 milliards d'années).

56. <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/detail-actu/envolee-du-cout-alimentaire-quels-nouveaux-reperes>

57. *Le Télégramme*, « Hydrogène blanc : nouvel or noir pour la Bretagne ? », F. Jacq, 7 septembre 2023, <https://www.letelegramme.fr/bretagne/hydrogene-blanc-un-nouvel-or-noir-dans-les-sols-bretons-6422808.php>

Figure 8.8. Carte simplifiée de la géologie du Massif armoricain montrant les quatre domaines géologiques principaux et les grands accidents qui les séparent.



Bretagne Nord

Dans le nord de la Bretagne (au nord du CNA), les terrains ont été structurés pour l'essentiel au cours de l'orogénèse cadomienne (Ballèvre *et al.*, 2012). En allant du nord-ouest au sud-est, l'unité du Trégor-La Hague comprend un vaste ensemble de roches plutoniques (granites et granodiorites) et volcaniques, de composition acide (rhyolites) à basique (basaltes), surmontées par des formations sédimentaires. C'est dans cette unité qu'ont été reconnues les reliques d'âge très ancien (2 milliards d'années, les plus vieilles roches de France). L'unité de Saint-Brieuc, quant à elle, comporte, au-dessus d'un socle de composition granitique, une épaisse séquence volcanique et sédimentaire, elle-même intrudée par de nombreux plutons de gabbros et de diorites. L'unité de Saint-Malo expose des terrains sédimentaires qui ont subi un métamorphisme allant localement jusqu'à la fusion partielle. Enfin, l'unité de Fougères

est constituée de séries sédimentaires épaisses intrudées par de nombreux plutons granitiques qui scellent la fin de l'épisode cadomien. Signalons la présence de serpentinites (voir chapitre 4), qui jalonnent la frontière entre les ensembles cadomiens orogéniques (au nord) et continentaux (au sud) et qui constituent le plus ancien exemple de roches mantelliques en Bretagne (Chauris, 1990).

Bretagne centrale

La Bretagne centrale (domaine médio-armoricain) expose principalement des terrains sédimentaires peu métamorphiques déposés sur le socle cadomien (Le Corre *et al.*, 1991). En allant de la plus ancienne à la plus jeune, les séries comprennent les terrains briovériens interprétés comme des matériaux de démantèlement de la chaîne cadomienne. Leur âge est intermédiaire entre le Protérozoïque et le Paléozoïque (550-650 millions d'années). Ces formations briovériennes sont surmontées en discordance par des sédiments ordoviciens à carbonifères (bassins de Châteaulin-Crozon, de la Vilaine, de Laval, 320-490 millions d'années). De nombreux granites d'âges hercyniens (310-340 millions d'années) se mettent en place dans les formations sédimentaires. L'ensemble des terrains est affecté par des déformations hercyniennes d'intensité moyenne conduisant à la formation de schistes.

Bretagne Sud

La Bretagne Sud (domaine sud-armoricain) est le domaine le plus affecté par les événements hercyniens, qui y atteignent leur intensité maximale (Le Corre *et al.*, 1991). Les roches sédimentaires y sont rares et on observe surtout des roches métamorphiques et des granitoïdes. Le métamorphisme est de haute température, il atteint la fusion partielle de la croûte continentale, tandis que d'autres unités montrent des événements de haute pression. Ce domaine se caractérise aussi par des formations très particulières qui sont les témoins de domaines océaniques impliqués dans l'orogénèse hercynienne. Un de ces domaines est le complexe de la baie d'Audierne (figure 8.9). Il comprend, du nord au sud, des péridotites serpentinisées, des métagabbros et enfin des amphibolites dérivant vraisemblablement de basaltes (Ballèvre *et al.*, 2012), une séquence qui fait de ce complexe un exemple de croûte océanique (ophiolite) fossile. Par ailleurs, les granitoïdes sont très nombreux dans le domaine sud-armoricain et ils ont des âges variés, le plus souvent carbonifères. La déformation est intense, principalement marquée par des chevauchements. Ce domaine complexe expose surtout l'évolution précoce de la chaîne hercynienne, l'histoire tardi-hercynienne étant mieux représentée dans le domaine médio-armoricain.

Léon

Le domaine du Léon présente de nombreux points communs avec le domaine sud-armoricain. Il est structuré autour d'un cœur de roches métamorphiques de haut grade, inclut des roches de haute pression et comprend des granitoïdes de différents types et âges.

Figure 8.9. La carrière du moulin de Pontalan en Peumérít, dans le complexe de la baie d'Audierne (Finistère).
A. Vue d'ensemble. B. Échantillon de serpentinite (péridotite serpentinisée), témoin d'une croûte océanique fossile.



Source : Ballèvre *et al.*, 2018 ; © M. Jonin / SGMB, 2018.

I Les opportunités autour de l'hydrogène naturel

Comme illustré sur la figure 4.8, les principaux types d'environnements géologiques favorables à l'exploration d' H_2 naturel sont les dorsales (ou rides) océaniques, les ophiolites (roches d'origine océanique charriées sur les continents) et les cratons (portions de croûtes continentales d'âge ancien). En tant que domaine géologique uniquement continental, la Bretagne n'expose pas de roches des fonds océaniques actuels. Par contre, des exemples de croûtes océaniques fossiles (ophiolites) incorporées dans les masses continentales au cours de l'histoire géologique y sont connus, tels que la ceinture de serpentinites briovériennes (Chauris, 1990) de Belle-Isle-en-Terre et le complexe de la baie d'Audierne (Ballèvre *et al.*, 2012 ; SGMB, 2018). Par ailleurs, les terrains bretons, quoiqu'anciens, sont globalement plus jeunes que les cratons évoqués au chapitre 4 (voir « L'hydrogène continental »). Le Massif armoricain n'est pas considéré géologiquement comme un craton. Toutefois, la prédominance des roches métamorphiques et des granites dans les domaines sud-armoricain et du Léon, et dans une certaine mesure dans le domaine nord-armoricain, confère à ces terrains, comme aux cratons, une intéressante capacité (concentrations élevées en éléments radioactifs, uranium, thorium et potassium) de production d' H_2 par radiolyse. Enfin, une dernière caractéristique générale de la géologie bretonne avec des conséquences pour la recherche de l' H_2 tient à la présence de failles qui permettent la remontée de fluides d'origine profonde (figure 8.8).

Tableau 8.1. Contextes géologiques favorables à la recherche d'hydrogène naturel en Bretagne.

Contexte géologique	Mécanisme de production d' H_2	Cible d'exploration
Ophiolite briovérienne	Serpentinisation	Domaine nord-armoricain briovérien Ceinture de serpentinites de Belle-Isle-en-Terre
Ophiolite hercynienne	Serpentinisation	Domaine sud-armoricain Complexe de la baie d'Audierne
Intrusions magmatiques	Interactions fluides-roches	Domaine nord-armoricain Massif de Saint-Jean-du-Doigt
Formations volcano-sédimentaires riches en fer	Interactions fluides-roches	Domaine médio-armoricain Bordure nord du bassin de Châteaulin
Terrains granitiques et gneissiques	Radiolyse	Domaine sud-armoricain Léon
Accidents, failles	Drainage de fluides profonds hydrogénés	Tous domaines

Un inventaire préliminaire des sites géologiques favorables à la recherche d' H_2 en Bretagne est présenté dans le tableau 8.1. Il comprend tout d'abord les domaines ophiolitiques de la région de Belle-Isle-en-Terre et de la baie d'Audierne. Les travaux d'exploration menés dans la zone nord-pyrénéenne, comme sur les ophiolites de Nouvelle-Calédonie (présentés au chapitre 4) ou ailleurs, font de ces contextes des sites privilégiés pour la recherche d' H_2 . L'hydrogène y est produit par un mécanisme (serpentinisation) similaire à celui observé au niveau des rides océaniques. Ensuite, certaines intrusions magmatiques de chimisme particulier (riches en fer et en alcalins, comme le massif de Saint-Jean-du-Doigt, à l'est de la baie de Morlaix) peuvent développer des types d'interactions fluides-roches susceptibles de produire de l'hydrogène. De même, les formations volcano-sédimentaires riches en fer qui jalonnent la bordure nord du bassin de Châteaulin pourraient être associées à des émanations d' H_2 . De façon plus globale, les terrains granitiques et gneissiques des domaines sud-armoricain et du Léon constituent des cibles à inventorier pour l'émission d'hydrogène. La présence de grandes failles affectant probablement la totalité de la croûte rend aussi possible l'arrivée en surface de fluides pouvant transporter de l' H_2 d'origine profonde. Ces différents contextes géologiques constituent un point de départ pour orienter les recherches d' H_2 naturel en Bretagne.

Conclusion

Pour reprendre la manchette du *Télégramme* évoquée au chapitre 1, la Bretagne peut se prévaloir, en ce qui concerne les utilisations de l'hydrogène, d'être « dans la course ». Elle bénéficie pour cela de plusieurs atouts, le principal étant sa situation dans le domaine de l'énergie. L'augmentation de la production énergétique bretonne à partir des énergies renouvelables ainsi que les perspectives qu'ouvrent les projets d'équipement anticipent les évolutions attendues dans les sources d'énergie au niveau national et au-delà. Elles permettent aussi de positionner la Bretagne comme une région productrice d'hydrogène vert. Ce n'est pas la seule région à prétendre à ce statut, mais la filière bretonne de production d'hydrogène vert peut toutefois mettre en avant certaines spécificités, comme l'éolien en mer.

Une large gamme d'utilisations de l'hydrogène se développe actuellement dans les principaux secteurs d'activités bretons. La filière maritime est soutenue au niveau régional et elle bénéficie d'une structuration à l'échelle européenne. Toutefois, son développement à grande échelle est encore conditionné par les facteurs macroéconomiques. L'électrolyse est en effet perçue comme la voie principale pour produire de l' H_2 (en dehors des combustibles fossiles), et l'emploi de l'hydrogène est donc directement dépendant du coût de l'électricité. Cet état de fait est moins généralisé dans les applications « terrestres » de l'hydrogène comme l'agriculture et l'agroalimentaire. Cependant, les entreprises de transformation du secteur sont elles aussi soumises

aux mêmes contraintes macroéconomiques (prix de l'électricité), alors que les entreprises de production (exploitations agricoles) sont plus à même de pouvoir bénéficier d'avantages liés à des sources d'énergie locales. À ceci s'ajoute l'émergence de nouvelles exploitations plus autonomes sur le plan énergétique, une évolution qui se marque aussi dans l'essor des initiatives citoyennes de production d'énergie, toutes ces démarches reposant sur les énergies renouvelables.

Soulignons enfin que la Bretagne dispose d'un potentiel dans le domaine de l'hydrogène naturel. Celui-ci demande à être évalué en détail à partir des connaissances existantes sur la géologie bretonne et sur l'environnement naturel.

Conclusion générale

Dans cet ouvrage, nous avons précisé les éléments scientifiques et technologiques qui conditionnent l'emploi de l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique. Nous y avons également identifié les avantages, mais aussi les inconvénients liés à son utilisation. Il est apparu que son usage peut avoir des conséquences très positives pour le stockage et la conversion de l'énergie, deux aspects clés des politiques et des pratiques énergétiques futures. Par contre, le secteur de l'hydrogène naturel reste encore indécis, même s'il représente une opportunité majeure qui doit être prise en compte. Nous avons intégré ces éléments dans une analyse macroéconomique fondée sur diverses projections qui attribuent toutes un rôle important à l'hydrogène, même si certains scénarios ressemblent plus à des paris qu'à des objectifs atteignables à court terme.

En parallèle, nous avons transposé ces considérations technologiques et macroéconomiques autour de l'hydrogène à l'échelle régionale, la région étant considérée comme une collectivité cohérente pour scruter la réception qui y est faite des pratiques autour de l'hydrogène et de la transition énergétique. Nous avons mené cette analyse de la dimension locale à partir du cas représentatif de la Bretagne. Cet exercice a clairement mis en avant l'importance de l'énergie comme facteur susceptible de conditionner tous les développements intervenant en aval, que ce soit sur la production ou les utilisations de l'hydrogène. Il a aussi permis de caractériser un certain nombre de spécificités locales et de filières déjà opérationnelles. Toutefois, nous avons clairement identifié certains verrous, comme les coûts de l'électrolyse et de l'électricité, qui freinent actuellement l'extension et la généralisation des usages de cette ressource. Néanmoins, le sentiment qui domine est celui d'une mobilisation et d'un dynamisme au niveau régional qui contrastent avec la relative stagnation observée à l'échelle nationale et européenne.

Un dernier élément, sur lequel il paraît utile d'insister en conclusion de cet ouvrage, porte sur la dimension sociétale des pratiques autour de l'hydrogène. Nous avons noté les tendances profondes qui se manifestent vers un mode de gestion plus décentralisé des ressources énergétiques. Il est clair que les aspirations individuelles vers davantage d'autonomie, combinées avec les possibilités qu'offrent les énergies renouvelables, remettent en cause de façon fondamentale le modèle centralisé de gestion de l'énergie qui a prévalu depuis presque un siècle en France. Dans cette évolution, l'hydrogène constitue un élément véritablement clé. En effet, certaines énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien doivent, pour être performantes dans la durée, être couplées avec des technologies de stockage et de conversion de l'énergie.

La transition vers des sources d'énergies renouvelables et leur substitution, à terme, aux combustibles fossiles doivent donc s'accompagner d'un accroissement des moyens

de stockage et de conversion. Parmi ces derniers, les solutions de l'hydrogène sont, aujourd'hui, probablement les plus fiables et les plus prometteuses. Leur implantation va donc rendre possibles et accélérer les évolutions en cours. On peut en attendre un effet d'entraînement au bénéfice de nouvelles pratiques de gestion décentralisée de l'énergie. Cette tendance est déjà présente au niveau individuel dans les régions, avec l'augmentation des projets citoyens de production d'énergie, principalement solaire. Au niveau collectif, la constitution de boucles énergétiques locales autour d'un site de production d'hydrogène, l'installation d'infrastructures dédiées, l'établissement de réseaux locaux de distribution et le développement des utilisations, tous ces éléments préfigurent un mode de gestion de l'énergie dans lequel la dimension locale joue un rôle essentiel. Ainsi, l'hydrogène peut être vu comme un facteur favorisant les adaptations non seulement technologiques, mais aussi les modes d'organisation sociétales, qui sont rendus nécessaires par la transition énergétique.

Ces tendances vers davantage d'autonomie et d'indépendance devraient occuper une place centrale dans les débats à venir autour de la politique énergétique. Sur ce point, comme d'ailleurs dans d'autres (mentionnons par exemple les modes de gestion de l'eau), le niveau local devrait être appelé à prendre une importance grandissante. Sans préjuger des évolutions administratives et politiques futures, les pratiques de l'hydrogène contribuent à cette mutation qui rejoint les aspirations profondes de certaines régions. C'est aussi dans un sens sociétal, et non seulement technologique, que l'hydrogène représente une véritable opportunité pour la transition énergétique.

Références bibliographiques

- Ballèvre M., Bosse V. *et al.*, 2012. Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, 10-11, 5-96.
- BDI, 2021. *Annuaire et carte des projets hydrogène renouvelable en Bretagne*, Bretagne Développement Innovation. https://www.bdi.fr/fr/publications/annuaire-et-carte-des-projets-hydrogene-renouvelable-en-bretagne/?__hstc=220433031.f3dc1d5df48d9ac6f70142a149a83253.1730630861499.1736931435067.1737038958626.6&__hssc=220433031.1737038958626&__hsfp=3284005448#annuaire-des-projets
- BRGM, 2015. Le stockage géologique d'énergie sous forme d'hydrogène. In : *Journée hydrogène naturel*, Société géologique de France, Paris, 30 septembre 2015. <https://www.geosoc.fr/liens-docman/conferences/2015/hydrogene-naturel/1082-stockage-geologique-de-l-hydrogene-potentiel-et-enjeux/file.html>
- Charlou J.-L., Donval J.-P. *et al.*, 2002. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36° 14' N, MAR). *Chemical Geology*, 191, 345-359.
- Chauris L., 1990. La ceinture de serpentinites chromifères de Bretagne septentrionale et son appartenance au Briovérien. *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, 311, Série II, 965-970.
- Deville E., Prinzhofer A., 2016. The origin of N₂-H₂-CH₄-rich natural gas seepages in ophiolitic context: a major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia. *Chemical Geology*, 440, 139-147.
- Dubessy J., Pagel M. *et al.*, 1988. Radiolysis evidenced by H₂-O₂ and H₂-bearing fluid inclusions in three uranium deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 1155-1167.
- Fauguerolles C., 2016. Étude expérimentale de la production d'H₂ associée à la serpentinisation des péridotites au niveau des dorsales océaniques lentes : quantification, états redox, mécanismes réactionnels. Thèse, université d'Orléans. <https://theses.hal.science/tel-01549129>
- France Hydrogène, 2018. Les piles à combustible. In : *L'Encyclopédie H₂*. <https://www.france-hydrogene.org/technical-sheet/5-2-1-les-piles-a-combustible>
- France Hydrogène, 2019a. Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles. In : *L'Encyclopédie H₂*. <https://www.france-hydrogene.org/technical-sheet/3-1-1-production-dhydrogene-a-partir-des-combustibles-fossiles>
- France Hydrogène, 2019b. Production d'hydrogène à partir de la biomasse. In : *L'Encyclopédie H₂*. <https://www.france-hydrogene.org/technical-sheet/3-3-1-production-dhydrogene-a-partir-de-la-biomasse>
- France Hydrogène, 2023. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. In : *L'Encyclopédie H₂*. <https://www.france-hydrogene.org/technical-sheet/3-2-1-production-dhydrogene-par-electrolyse-de-leau>
- Gaucher E.C., Moretti I. *et al.*, 2023. The place of natural hydrogen in the energy transition: a position paper. *European Geologist*, 55, 5-9.
- GIEC, 2018. Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté (V. Masson-Delmotte *et al.*, dir.), Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf
- IEA, 2021. Energy Technology Perspectives 2020. Report, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- IEA, 2026. What it would take to unlock the next phase of hydrogen growth. Commentary, IEA, Paris. <https://www.iea.org/commentaries/what-it-would-take-to-unlock-the-next-phase-of-hydrogen-growth>
- Larin N.V., Zgonnik V. *et al.*, 2014. Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia. *Natural Resources Research*, 24, 369-383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
- Le Corre C., Auvray B. *et al.*, 1991. Le Massif armoricain. *Sciences géologiques Bulletin*, 44 (1-2), 31-103. <https://doi.org/10.3406/sgeol.1991.1865>
- Lefevure N., Truche L. *et al.*, 2021. Native H₂ exploration in the western pyrenean foothills. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009917. <https://doi.org/10.1029/2021GC009917>

- Lefeuve N., Truche L. *et al.*, 2022. Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: the North Pyrenean Frontal Thrust case study. *Applied Geochemistry*, 145, 105396.
- Légifrance, 2023. Arrêté du 23 novembre 2023 accordant un permis exclusif de recherches de mines d'hydrogène natif, hélium et substances connexes dit « Sauve Terre H₂ » (département des Pyrénées-Atlantiques). *JORF* n° 0280 du 3 décembre 2023. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000048501854>
- Maiga O., Deville E. *et al.*, 2023. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Scientific Reports*, 13, 11876. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38977-y>
- Maiga O., Deville E. *et al.*, 2024. Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: the emblematic case of the Bourakebougou H₂ field in Mali. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 640-647.
- Moretti I., Brouilly E. *et al.*, 2021. Hydrogen emanations in intracratonic areas: new guide lines for early exploration basin screening. *Geosciences*, 11 (3), 145. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030145>
- Myagkiy, A., Moretti, I., Brunet, F. 2020. Space and time distribution of subsurface H₂ concentration in so-called “fairy circles”: insight from a conceptual 2-D transport model. *Bulletin de la Société géologique de France*, 191, 13. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020010>
- négaWatt, 2022. La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale. Scénario négaWatt 2022-2050. <https://www.negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>
- Nivin V.A., 2016. Free hydrogen-hydrocarbon gases from the Lovozero loparite deposit (Kola Peninsula, NW Russia). *Applied Geochemistry*, 52, 1155-1167.
- OEB, 2017. Mémento des chiffres clés en Bretagne. In : *Conférence bretonne de la transition énergétique*, Bilan périodique, Observatoire de l'environnement en Bretagne, 1^{er} janvier 2017. <https://bretagne-environnement.fr/collection-documentaire/memento-chiffres-cles-bretagne-conference-bretonne-transition-energetique>
- OEB, 2023. Mémento des chiffres clés en Bretagne en 2021. In : *Conférence bretonne de la transition énergétique* du 28 novembre 2023, Observatoire de l'environnement en Bretagne. <https://bretagne-environnement.fr/notice-documentaire/memento-des-chiffres-cles-en-bretagne-en-2021-conference-bretonne-de-la>
- OEB, 2025a. Chiffres clés de l'énergie et des gaz à effet de serre en Bretagne. Édition 2025. <https://bretagne-environnement.fr/notice-documentaire/chiffres-cles-energie-bretagne-2025>
- OEB, 2025b. La consommation d'énergie en Bretagne en 2024. <https://bretagne-environnement.fr/tableau-de-bord/la-consommation-denergie-en-bretagne>
- Osselin F., Soulaïne C. *et al.*, 2022. Orange hydrogen is the new green. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9>
- Prinzhofer A., Cissé C.S.T *et al.*, 2018. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 19315-19326.
- Prinzhofer A., Rigollet C., 2022. L'hydrogène naturel, une nouvelle source d'énergie décarbonée et renouvelable, compétitive face aux hydrocarbures. *Géologues*, 213, 79-86.
- Prinzhofer A., Rigollet C. *et al.*, 2024. Marica (Brazil), the new naturel hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 91-98.
- RTE, 2020. La transition vers un hydrogène bas carbone. Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035. Rapport du Réseau de transport d'électricité, 69 p. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/rapport%20hydrogene.pdf>
- RTE, 2021a. Futurs énergétiques 2050 : principaux résultats. Rapport du Réseau de transport d'électricité, 64 p. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_o.pdf
- RTE, 2021b. Bilan électrique 2020 région Bretagne. Réseau de transport d'électricité. <https://www.rte-france.com/actualites/bilan-electrique-2020-region-bretagne>
- RTE, 2025. Bilan électrique 2024 région Bretagne. Réseau de transport d'électricité. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-09/2025-09-23-bilan-electrique-2024-bretagne.pdf>
- SDES, 2025. *Chiffres clés de l'énergie*, édition 2025, Datalab. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie/fr/pdf/chiffres-cles-energie-2025.pdf>
- SGAE, 2024. L'Europe a redonné toute sa place à l'énergie nucléaire ! Fiche du Secrétariat général des affaires européennes. https://sgae.gouv.fr/files/live/sites/SGAE/files/Contributed/SGAE/01_SGAE/documents/12%20actions%20qui%20ont%20transforme%20le%20UE/Fiche%2012%20-%20L%20e2%80%99Europe%20a%20redonne-1.pdf

SGMB, 2018. Dossier préparatoire des arrêtés-listes départementaux des sites d'intérêt géologique. Site d'intérêt géologique : la carrière du Moulin de Pontalan. Société géologique et minéralogique de Bretagne, 6 p. https://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/bre_0183_moulin_pontalan.pdf

Toulhoat H., Zgonnik V., 2022. Chemical differentiation of planets: a core issue. *The Astrophysical Journal*, 924 (83). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac300b>

Zgonnik V., 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review. *Earth Science Reviews*, 203, 103140.

Remerciements

L'écriture de cet ouvrage a bénéficié des travaux de recherche sur l'hydrogène menés à l'Institut des sciences de la terre d'Orléans (ISTO). Ils ont été réalisés principalement dans le cadre du projet ANR Fluxhyd (coordinateur M. Pichavant). T. Castelain, J. Villeneuve et tout particulièrement C. Fauguerolles ont contribué à ces travaux et à la mise au point des essais de serpentinisation expérimentale. Nous remercions également les autres partenaires du projet, notamment J. Dubessy, A.-M. Boullier, M. Cannat, C. Mevel et P. Nehlig pour leur participation. F. Osselin et son équipe ont, par la suite, poursuivi et développé les recherches initiées dans ce projet. Rappelons que les premiers travaux expérimentaux autour de l'hydrogène à l'ISTO ont été effectués avec B. Scaillet. Les conseils éditoriaux prodigués par G. Richard ont été appréciés et se sont révélés très utiles.

Cet ouvrage a bénéficié de la lecture critique et des commentaires détaillés de P. Nehlig. Il a aussi grandement mis à profit les conférences de l'auteur sur l'hydrogène, notamment celles présentées dans le cadre de diverses universités du temps libre (UTL) en Bretagne. A. Le Bris et J.-R. Geoffroy sont remerciés tout particulièrement pour les invitations ainsi que pour la bonne organisation matérielle des conférences. Nous remercions aussi N. Bot-Jaffray, C. Fauguerolles, M. Jonin, L. Leclerc, N. Lefeuve, A. Prinzhoffer, C. Rigollet pour avoir autorisé la reproduction de photographies et de figures tirées de leurs travaux.

Enfin, C. Ramboz et M. Pichavant ont été des sources de motivation constantes au cours de l'écriture. Celle-ci a bénéficié du concours de A. Lacroix pour l'énergie en Bretagne. Je souhaite aussi souligner ici la qualité des ressources web sur l'hydrogène breton et remercier les responsables de Bretagne Développement Innovation (BDI).

Je remercie également G. Doité et l'équipe éditoriale des éditions Quæ pour la qualité de leur travail.

Illustration de couverture : Nora Maleplate
Coordination éditoriale : Géraldine Doité
Édition : Juliette Blanchet
Mise en page :  **EliLoCom**
Couverture et infographie : Anaïs Naïmi

Achevé d'imprimer en septembre 2026 par Isiprint.

Numéro d'impression :

Dépôt légal : octobre 2026

L'hydrogène est souvent présenté comme l'une des solutions majeures de la transition énergétique. Son utilisation pourrait transformer en profondeur la production, le stockage et le transport de l'énergie. Porté par les acteurs économiques et les politiques publiques, il suscite de nombreux investissements et projets. Pourtant, la filière se trouve aujourd'hui à un tournant : entre développement rapide et abandon à terme.

Pour comprendre ce moment charnière, l'auteur croise deux échelles d'analyse. À l'échelle globale, il examine les évolutions technologiques, les équilibres économiques et les orientations politiques qui déterminent l'avenir de l'hydrogène. À l'échelle locale, il étudie la manière dont les territoires s'approprient ces dynamiques, conçoivent des projets et organisent de nouvelles formes de production et de gestion de l'énergie. La Bretagne offre ainsi un terrain privilégié pour observer cette articulation entre ambitions générales et réalisations concrètes.

Destiné au grand public, aux associations et aux collectivités, cet ouvrage donne des clés pour appréhender ces enjeux. Il dresse un état des lieux des initiatives en cours et analyse les filières et les perspectives de développement à l'échelle des territoires.

Géologue de formation et docteur d'État, **Michel Pichavant** est directeur de recherche émérite au CNRS. Il a coordonné plusieurs programmes de recherche de niveau national et européen. Il se consacre aujourd'hui à la vulgarisation scientifique autour de l'hydrogène, des granites et minéralisations associées ainsi que des volcans.



éditions
Quæ

Éditions CIRAD, Ifremer, INRAE
www.quae.com

18 €

ISBN : 978-2-7592-4307-5



Réf. : 03068