L’hydrogène: comment une molécule découverte il y a plus de 5 siècles est devenue l’objet d’un emballement très récent de la recherche scientifique

written by Aurore Richel



For the English version, scan this QR Code or click here

L’hydrogène est une molécule aux multiples applications, jouant un rôle économique crucial dans de nombreux domaines, de la production d’ammoniac à la désulfuration des carburants de roulage, en passant par l’industrie agro-alimentaire, la métallurgie ou l’exploration spatiale. Son potentiel en tant que vecteur d’énergie propre en fait un d’intérêt croissant dans la lutte contre le changement climatique et la transition vers une économie plus durable.

Même si le nom « hydrogène » est aujourd’hui associé à l’innovation et à la modernité, l’histoire de cette molécule est bien plus

ancienne qu'on ne le croit. Cette molécule, découverte il y a plus de cinq siècles, possède en effet un passé bien plus riche et imprévisible que prévu.

Ce texte est la retranscription d'une lecture donnée dans le cadre du congrès « Joining forces on hydrogen » organisé par le Belgian Hydrogen Council le 16 octobre 2023. L'ensemble des slides peut être téléchargés ici.

Les premiers jours de l'hydrogène – une découverte sur fond de magie

L'hydrogène (H_2) est la molécule la plus minuscule et la plus énigmatique du monde de la chimie. L'hydrogène, même s'il peut être trouvé naturellement dans certains sites géologiques, ne doit son existence que grâce aux artifices de la chimie : dans la majorité des cas, l'hydrogène doit en effet être synthétisé.

C'est d'ailleurs en le synthétisant, par le plus pur des hasards, que l'hydrogène a été observé pour la première fois il y a plus de cinq siècles par Paracelse, un alchimiste-philosophe. Au détour de ses expérimentations alchimiques et de quêtes ésotériques, Paracelse observa qu'un gaz insaisissable, sans la moindre odeur ni coloration, se créait quand le vitriol (ancien nom de l'acide sulfurique) rencontrait le fer. Pourtant, même s'il fut le premier à apercevoir l'hydrogène et à le consigner dans ses écrits, Paracelse ne put comprendre ce que ce gaz représentait ni même de quoi il était composé (**Figure 1**).

C'est qu'à l'époque, travailler avec des gaz, ces composants invisibles et fuyants, n'était guère chose facile. Il fallut donc attendre plus d'un siècle pour que le brillant chimiste et physicien irlandais, Robert Boyle, ne parvienne pour la première fois à récolter dans une petite fiole ce gaz nouveau, né du contact de l'acide et des métaux. Cependant, l'énigme persistait : Boyle n'était pas capable de distinguer l'hydrogène de l'air ambiant. Année après année, les savants de l'époque vont souligner que ce gaz, dont on ne connaissait toujours pas la structure et qui ne portait toujours pas de nom, pouvait s'enflammer et même exploser au contact d'une flamme. Le gaz inconnu dégageait alors une énergie impressionnante. Il fallut attendre le Siècle des Lumières et

l’abandon du vieux rêve alchimique, pour que le chimiste français Antoine Lavoisier ne s’intéresse enfin, dans les méandres de la chimie moderne, à ce gaz inflammable qui avait attisé la curiosité des savants depuis plus de deux siècles. En 1783, il lui donna le nom d’hydrogène, après avoir observé que ce gaz libérait de l’eau quand il réagissait avec l’oxygène.

L’hydrogène, le souffle magique d’antan, fut ainsi reconnu comme une molécule artificielle, que l’on pouvait produire par réaction chimique. Au tournant du 18ème siècle, l’hydrogène avait un nom, une origine bien établie, mais aussi une structure bien identifiée. Les propriétés de la molécule, dont certaines avaient déjà été mises en exergue par les alchimistes du passé, n’allaient cesser de s’enrichir avec le développement du savoir et des techniques de la chimie moderne. Il apparut ainsi que l’hydrogène était peu dense, bien plus léger que l’air ambiant. Il permettait de gonfler des ballons et des dirigeables. Au contact de l’oxygène, dans une enceinte spécialement dessinée, il pouvait produire de l’énergie, sous la forme de courant, et de l’eau. Même Jules Verne, dans son roman l’*Ile Mystérieuse* paru en 1875, rêvait de l’hydrogène et de son contact avec l’oxygène, le voyant comme « *une source de chaleur et de lumière inépuisable et d’une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu du charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique* ».

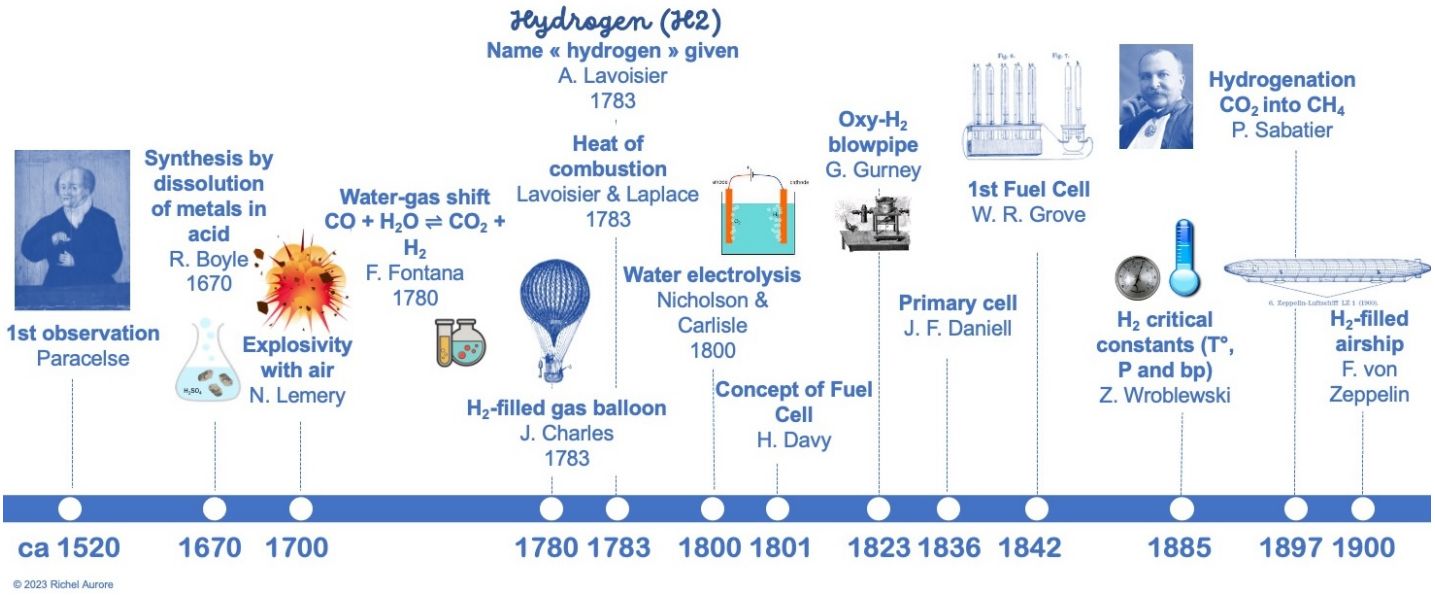

Figure 1. Premiers instants de l'histoire de l'hydrogène. Période entre le 16ème et le 19ème siècles.

La production d'hydrogène, en dehors de la méthode traditionnelle basée sur le contact entre des acides et des métaux, représentait déjà une réalité tangible. En cette année charnière de 1800, deux éminents scientifiques britanniques, William Nicholson et Anthony Carlisle, accomplirent un exploit scientifique remarquable. Quelques jours à peine après la naissance de la toute première pile électrique, fruit du génie d'Alessandro Volta, ces érudits parvinrent à mettre au point le procédé sophistiqué de l'électrolyse de l'eau. Cette méthode ingénieuse permit de décomposer l'eau en ses composants fondamentaux, à savoir l'oxygène et l'hydrogène, en faisant circuler un courant électrique entre deux fines plaques métalliques immergées dans l'eau. Il est réellement saisissant de réfléchir à l'ironie de la situation. À l'époque, au tournant du 19e siècle, cette découverte semblait déjà solidement ancrée dans la connaissance scientifique. Cependant, à l'aube du 21e siècle, dans un contexte de préoccupations environnementales et énergétiques croissantes, elle allait redevenir un sujet d'étude essentiel pour les chercheurs contemporains, à la recherche d'une source d'hydrogène « verte » et vertueuse.

Des zeppelins aux explorations spatiales : un siècle de profusions commerciales

Alors que les premières recherches avaient mis en évidence les qualités énergétiques et la densité de l'hydrogène, le début du 20e siècle marqua un tournant dans l'histoire des applications de l'hydrogène, un changement anticipé par Paul Sabatier dès 1897. L'hydrogène, en raison de sa nature hautement réactive, démontrait sa capacité à interagir avec de nombreuses molécules. Lorsqu'il était utilisé pour traiter des huiles végétales liquides, celles-ci se transformaient en une substance solide, donnant ainsi naissance à la margarine.

Lorsque l'hydrogène était soumis à une réaction avec l'azote, dans des réacteurs spécialement conçus en présence de catalyseurs, il se convertissait en ammoniac (NH_3), devenant ainsi un maillon essentiel

dans la production d'engrais azotés. De plus, l'hydrogène avait la faculté de se métamorphoser en méthane ou en méthanol lorsqu'il entrait en contact avec du dioxyde de carbone (CO_2) ou du monoxyde de carbone (CO). Ces procédés, initiés bien avant le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, continuent d'être employés de nos jours. Ils représentent, par ailleurs, les applications industrielles prédominantes de l'hydrogène, aux côtés de la désulfuration, qui consiste à réduire la teneur en composés soufrés des carburants destinés aux transports, une technique qui a été développée à grande échelle en 1949 (**Figure 2**).

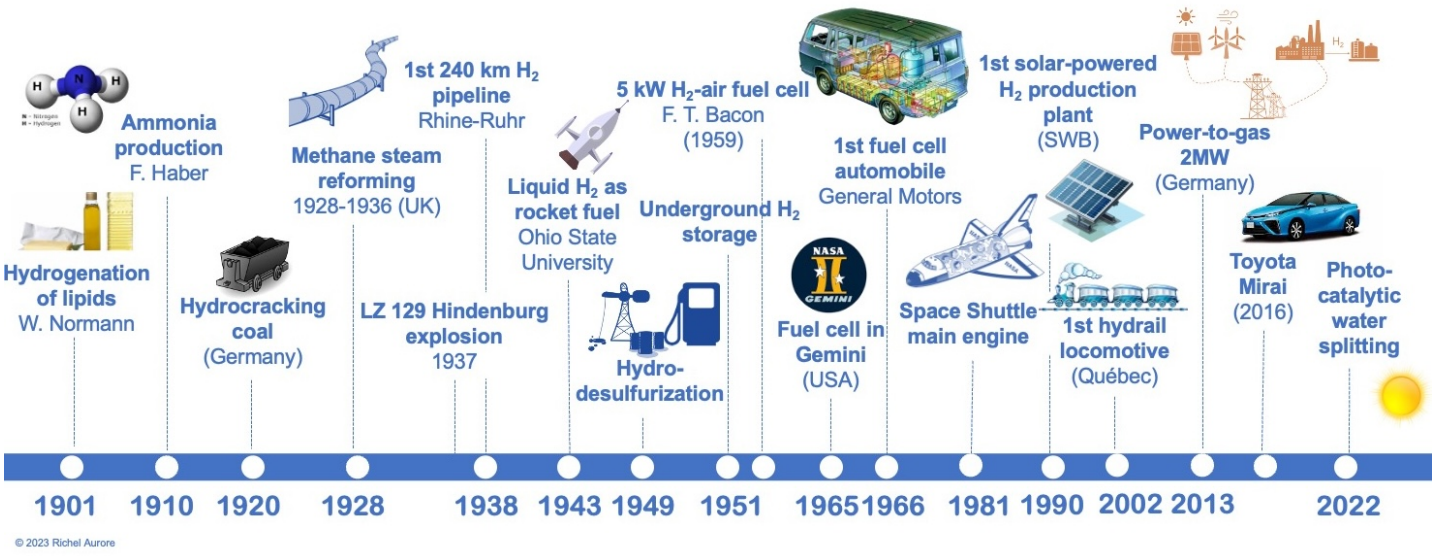

Figure 2. Histoire contemporaine de l'hydrogène : du début du 20ème siècle jusqu'à aujourd'hui.

Afin de répondre à la croissance incessante de la demande industrielle, l'électrolyse de l'eau, bien que déjà maîtrisée à l'époque, se révélait malheureusement inefficace. Les besoins énergétiques requis étaient excessifs, tandis que les rendements obtenus demeuraient insuffisants. Face à ce défi, les éminents chercheurs de l'époque se tournèrent vers les précieuses ressources fossiles, notamment le charbon et le gaz naturel.

La transformation du charbon en hydrogène, couramment appelée « gazéification », ainsi que le processus de conversion du méthane en hydrogène, connu sous le nom de « réformage à la vapeur », furent déployés à une échelle industrielle substantielle au cours des années 1920 et 1930. Il est néanmoins crucial de noter que ces méthodes, bien que couronnées de succès d'un point de vue pratique,

souffrent d'un inconvénient majeur, à savoir leur impact environnemental significatif. Elles engendrent en effet d'importantes quantités de composés carbonés, incluant le dioxyde de carbone, ce qui les classe parmi les méthodes à forte empreinte écologique. Cependant, il est à noter que ces techniques traditionnelles demeurent prédominantes à ce jour, représentant encore plus de 98% de la production mondiale d'hydrogène.

À la suite de la Seconde Guerre mondiale, l'hydrogène se trouva sous les feux de la rampe en ce qui concerne son utilisation dans le domaine de la mobilité. L'optimisation des piles à combustible, ces dispositifs éminemment remarquables découverts dès les années 1840 et capables de générer de l'électricité lorsque l'hydrogène rencontre l'oxygène, permit l'introduction sur le marché du tout premier fourgon automobile par General Motors en 1966, ainsi que de la Toyota Mirai en 2016.

L'utilisation de l'hydrogène pour alimenter des trains, des bus, et même des véhicules légers, a également fait l'objet d'une évaluation approfondie au cours des trois dernières décennies, avec des résultats variables. Parallèlement, l'hydrogène a connu son heure de gloire dans l'exploration spatiale américaine, depuis le programme Gemini jusqu'aux missions des dernières navettes spatiales. En effet, les piles à combustible embarquées ont joué un rôle essentiel en fournissant aux équipages les apports énergétiques nécessaires ainsi qu'un approvisionnement en eau suffisant.

Une recherche académique qui démarre tardivement et qui se concentre sur le lien entre hydrogène et énergie nucléaire

Au cours de ces cinq siècles marqués par des recherches intenses et des découvertes alignées avec des avancées industrielles majeures, les contributions scientifiques consignées par les universitaires ne devinrent véritablement notables qu'à partir des années 1970. Avant cette période, mis à part les écrits érudits des grands savants des 17ème au 19ème siècles, la littérature scientifique consacrée à l'hydrogène ne se révéla guère abondante, contrairement à d'autres domaines scientifiques qui suscitèrent l'engouement des équipes universitaires dès le début du 20ème siècle.

Il faudra ainsi attendre l'année 1972 et la publication du concept d'une « économie hydrogène » dans la prestigieuse revue *Science* pour que les institutions académiques commencent à envisager l'hydrogène comme une molécule dotée intrinsèquement du potentiel de s'étendre au-delà des applications commerciales déjà en cours (**Figure 3**).

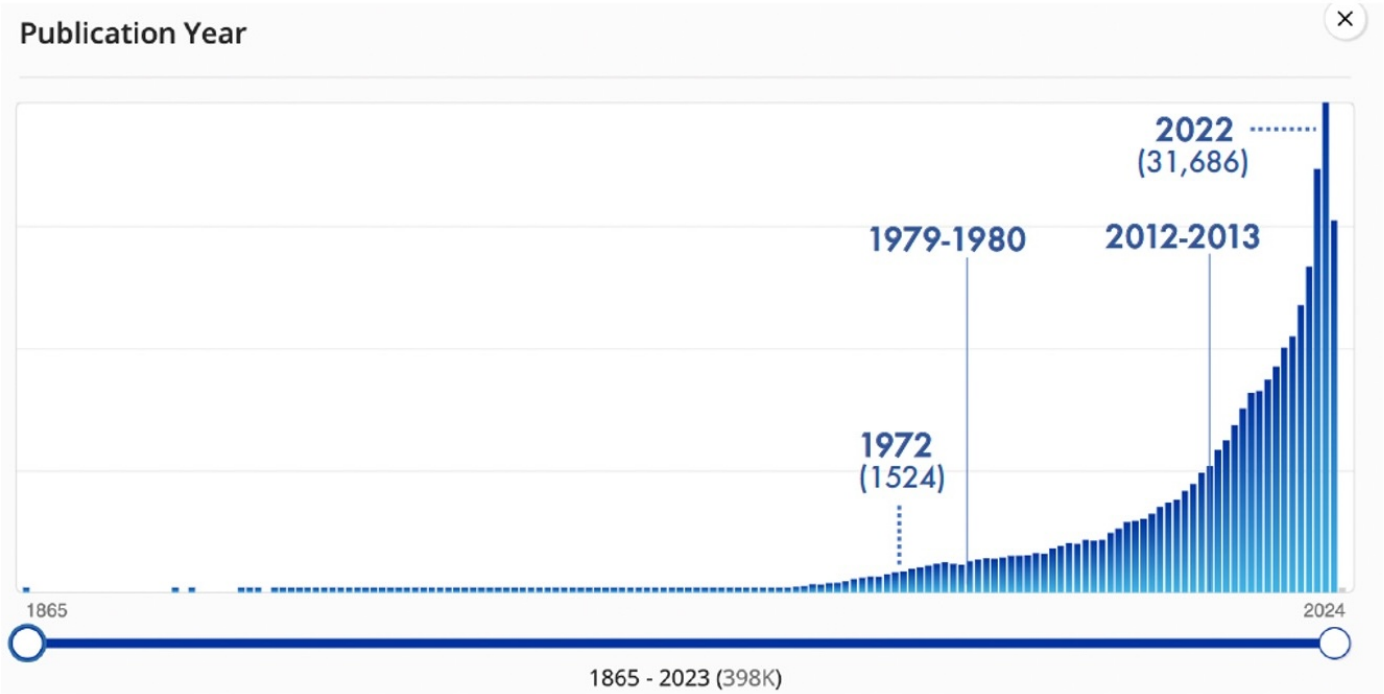

Figure 3. Évolution du nombre d'articles scientifiques publiés depuis la moitié du 19ème siècle jusqu'à nos jours et en lien avec l'hydrogène (source : SciFinder, base de données consultées en octobre 2023).

Dans les pages de la prestigieuse revue *Science*, le Professeur J. O'M. Bockris avança la perspective fascinante selon laquelle l'hydrogène pourrait servir de vecteur pour transporter l'énergie générée par les réacteurs nucléaires jusqu'aux utilisateurs finaux. Dans les premières formulations des rôles énergétiques de l'hydrogène en relation avec l'avenir, d'une manière tout à fait surprenante, l'hydrogène et l'énergie atomique étaient intimement liés. La proposition de Bockris reposait sur la mise en place de vastes plates-formes flottantes en pleine mer, où l'électrolyse de l'eau serait réalisée grâce à l'électricité fournie par des réacteurs nucléaires. L'hydrogène ainsi produit serait ensuite acheminé vers la terre ferme, où des stations se chargeraient de sa distribution aux industries ou aux particuliers. Bockris se

révélait être un visionnaire, soulignant que, du fait du fonctionnement en continu des réacteurs nucléaires, la production d'hydrogène ne serait pas sujette à des interruptions. Toutefois, il était conscient que l'acceptation de son idée par le grand public pourrait être entravée par plusieurs facteurs, notamment le conservatisme ambiant qui privilégiait les énergies fossiles, le manque de formation et d'éducation dans les nouvelles technologies liées à l'électrochimie, ainsi que la crainte du public concernant l'hydrogène et son caractère explosif.

Bockris était convaincu que ces obstacles pourraient être rapidement surmontés si la mobilité, en particulier les automobiles, devenait la première illustration évidente de son concept. Bien évidemment, tout cela a été publié avant l'accident de Tchernobyl, avant que le grand public et les autorités politiques ne changent définitivement leur regard sur l'énergie nucléaire. Quel paradoxe frappant de constater que l'idée persistante d'une production offshore d'hydrogène est encore bien ancrée dans les visions futures. Aujourd'hui, cependant, les énergies renouvelables intermittentes, et notamment les grandes éoliennes en mer, ont supplanté les réacteurs nucléaires qui étaient autrefois largement vantés par Bockris et ses contemporains.

Une recherche académique qui se structure en trois grandes périodes

Si nous scrutons attentivement les méandres de la recherche scientifique depuis la parution de l'œuvre de Bockris en 1972, nous distinguons clairement une évolution en trois temps (**Figure 3**). Dans le premier acte, couvrant la période de 1972 à 1979, émergent les prémices de la réflexion sur l'économie de l'hydrogène et sa place dans le paysage énergétique de cette ère. Les publications scientifiques se font rares, conformément aux pratiques de dissémination de savoir de cette période passée. Entre 1980 et 2012, la recherche sur l'hydrogène progresse de manière soutenue, bien que l'on perçoive un certain essoufflement et une stagnation graduelle. En revanche, depuis 2013, les écrits consacrés à l'hydrogène connaissent une éclosion spectaculaire. Cette renaissance s'explique d'une part par un changement dans les

pratiques de publication, qui met en avant l'adage célèbre « *publish or perish*« , et d'autre part par un regain d'intérêt pour l'hydrogène, le propulsant au centre des stratégies de transition énergétique.

Tout au long de ces cinq décennies de recherche, les universitaires se sont penchés sur tous les rouages de la chaîne de valeur de l'hydrogène, de la production aux domaines d'application, en passant par le stockage, la distribution, ainsi que les aspects technico-économiques et environnementaux (**Figure 4**). Les volets consacrés aux méthodes de production et aux applications de l'hydrogène, que ce soit en tant que réactif ou vecteur énergétique, représentent ensemble près de trois quarts de la production scientifique à ce jour. Il est à noter que, malgré sa découverte en 1800, l'électrolyse de l'eau n'a véritablement commencé à être explorée en détail en tant que méthode de production d'hydrogène que dans les années 70. Parallèlement, les méthodes traditionnelles de production à partir de ressources fossiles continuent d'être étudiées par les chercheurs, y compris de nos jours.

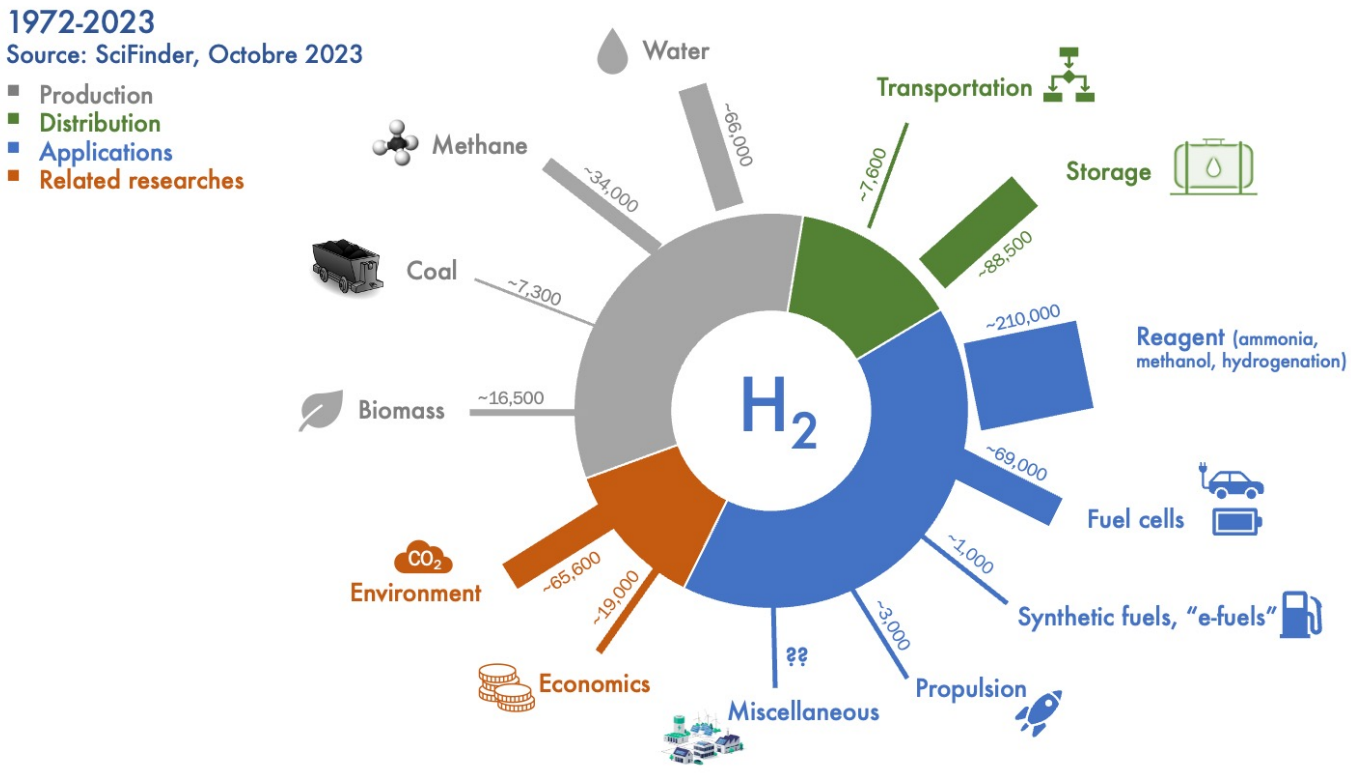

Figure 4. Répartition des publications relatives à l'hydrogène en fonction des sujets de recherche, sur l'ensemble de la chaine de valeur. Les chiffres mentionnés sur chaque domaine de recherche

illustrent le nombre total de publications enregistrées sur les cinquante dernières années.

Les années 1970 – la naissance des recherches universitaires sur l'hydrogène

Après la publication de l'œuvre de Bockris, une pléthore d'études holistiques prit son envol, plongeant profondément dans la complexité du concept de l'économie hydrogène. À cette époque marquée par les secousses énergétiques de 1973 et 1979, l'hydrogène se dessinait comme un potentiel messager d'énergie résiliente. Curieusement, les répercussions environnementales de cette avenue prometteuse n'étaient pas alors au premier plan des réflexions des chercheurs, ces derniers se concentrant essentiellement sur les volets de production et d'application de l'hydrogène, considérés comme des priorités incontournables.

C'est à l'orée de cette période, marquée par la naissance de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) et de l'Association Internationale pour l'Énergie Hydrogène (IAHE), que les investissements en recherche se dirigèrent essentiellement vers la quête d'une optimisation des procédés de production d'hydrogène. Parmi ces voies, l'intégration de l'énergie nucléaire comme pilier central de la production ne cessa de hanter les esprits. En fait, plus de la moitié des travaux publiés au cours de cette décennie s'attachaient à l'union entre l'hydrogène et l'énergie nucléaire, tissant un lien indissoluble entre ces deux domaines.

De 1980 à 2012 : une recherche qui s'enlise et devient exploratoire

À la sortie de la crise énergétique de 1979, l'impératif de rechercher des alternatives énergétiques se fit moins pressant. Toutefois, la quête d'une voie durable persista, portée par une volonté initiale d'améliorer la mobilité tout en respectant l'environnement, et soutenue par certains pionniers industriels. L'association entre l'hydrogène et l'énergie nucléaire, jadis solide, s'évanouit brusquement à la suite de la catastrophe de Tchernobyl en 1986.

La prise de conscience progressive du rôle joué par les gaz à effet

et du réchauffement climatique poussera progressivement les universités à s'orienter vers des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou l'énergie éolienne. L'hydrogène se positionnera ainsi comme une solution de stockage et de distribution de ces deux énergies renouvelables intermittentes dès les début des années 2000.

Durant cette période, la recherche sur l'hydrogène adressera des questions plus larges, notamment relatives au stockage de cette molécule et à son transport. Cette période sera également marquée par de nombreux travaux sur les piles à combustibles à destination du secteur du transport, mais également sur les premières évaluations environnementales de la chaine de valeur de l'hydrogène.

Depuis 2013 : une explosion de la recherche

Au cours de la dernière décennie, les publications de recherche sur l'hydrogène ont connu une ascension spectaculaire. L'augmentation progressive de la médiatisation des travaux du GIEC, combinée à une montée en puissance de la sensibilisation à l'urgence climatique, a débloqué des financements substantiels, insufflant une nouvelle vie aux investigations sur l'hydrogène. Cet élément est désormais perçu comme une source d'énergie pouvant être produite localement ou nationalement, réduisant la dépendance à l'égard de pays étrangers, et offrant ainsi une énergie propre et locale, qui, à tort, semble détachée de toute implication géopolitique.

Salué comme un vecteur énergétique abondant, abordable, largement accessible, et respectueux de l'environnement, l'hydrogène est indissociable de la production par électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables. Au-delà de cette vision, la recherche s'est épanouie dans diverses directions, avec des progrès notables dans l'amélioration des matériaux pour les électrolyseurs, l'innovation des membranes, l'exploration de nouvelles approches pour le stockage et le transport, l'étude de matériaux pour la modification des réseaux de gaz existants, des analyses techno-économiques approfondies, la production de carburants de synthèse et d'électro-carburants, des investigations sur les piles à combustible améliorées, et l'exploration des liens entre

l’hydrogène et la métallurgie.

Cependant, il apparaît que la recherche, malgré son élargissement, cherche encore sa véritable direction. Elle semble parfois réagir aux influences extérieures, qu’elles soient politiques, économiques, ou idéologiques, et pâtit parfois du manque de multidisciplinarité. Elle reste en quête d’une cohérence et d’une stabilité qui lui permettraient de déployer tout son potentiel.

Que faut-il retenir ?

L’hydrogène, jadis vanté comme « la » molécule du futur, a en réalité une histoire bien plus profonde que ses récentes éloges. Connu depuis plus de cinq siècles, il n’a attiré l’attention des universités que dans les années 1970, lorsque la nécessité de concevoir des systèmes énergétiques résilients est devenue cruciale.

Une plongée dans les données de recherche, reflétée par le nombre de publications, révèle trois époques distinctes qui ont marqué l’histoire de la recherche sur l’hydrogène. Chacune de ces périodes, influencée par des événements extérieurs bien définis, a donné naissance à des axes de recherche distincts, parfois même divergents.

En se penchant sur ces récits du passé relatifs à l’hydrogène, les chercheurs ont l’opportunité de réorganiser le paysage de la recherche actuelle. Cette démarche est cruciale pour éviter que l’hydrogène ne soit réduit à un simple phénomène passager, malgré un soutien environnemental, politique et économique massif. L’hydrogène mérite d’être un acteur durable dans le paysage énergétique du futur, et son histoire peut éclairer ce chemin.

Vous souhaitez plus d’informations sur ce sujet ?

N’hésitez pas à me contacter via l’adresse email suivante: a.richel@uliege.be ou via le formulaire disponible en cliquant ici.