

Le réseau international de recherche France – Canada du CNRS sur l'hydrogène décarboné : FC Clean H2 : amener la France et le Canada vers un futur à hydrogène bas-carbone

Résumé Les stratégies « hydrogène » française et canadienne établissent clairement que le développement des filières « hydrogène bas-carbone » est une priorité stratégique pour la transition énergétique et la décarbonisation des transports et de l'industrie. Les développements géopolitiques récents montrent que cette orientation n'est pas limitée à la France et au Canada. Par conséquent, la France et le Canada doivent endosser une position proactive de chefs de file mondiaux dans le développement du secteur hydrogène. En effet, l'hydrogène bas-carbone est appelé à jouer un rôle primordial pour permettre à la France et au Canada d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Le réseau international de recherche (International Research Network – IRN) du CNRS, « FC-H2 : Moving France and Canada to a Low-Carbon Hydrogen Future », est une initiative proposée par la fédération de recherche sur l'Hydrogène du CNRS (FRH2 n°2044) et l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Cette initiative a pour objectif de créer des interactions et collaborations entre des acteurs de recherche français et canadiens en impliquant dans son noyau dur cinq laboratoires français (IC2MP, LEPMI, IMN, ICMCB et FEMTO-ST) et cinq instituts canadiens (UQTR, INRS, SFU, UBC et UoC) qui se focaliseront sur le développement de technologies de production d'hydrogène bas-carbone.

Mots-clés Hydrogène bas-carbone, électrolyseurs, photo(électro)catalyse, conversion de la biomasse, intégration de systèmes, énergies renouvelables.

Abstract International Research Network (IRN) France-Canada: FC Clean H2: Moving France and Canada to a Low-Carbon Hydrogen Future

The French and Canadian hydrogen strategies clearly emphasize that the development of low-carbon hydrogen sectors is a strategic priority for the energy transition and the decarbonisation of transport and industry. Recent geopolitical developments show that this orientation is not limited to France and Canada. Therefore, France and Canada must take a proactive position as world leaders in the development of the hydrogen sector. Indeed, low-carbon hydrogen is expected to play a key role in enabling France and Canada to achieve carbon neutrality by 2050. The CNRS International Research Network (IRN), "FC-H2: Moving France and Canada to a Low-Carbon Hydrogen Future", is an initiative proposed by the CNRS Hydrogen Research Federation (FRH2 n°2044) and the Hydrogen Research Institute (HRI) at the Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). This initiative aims to create interactions and collaborations between French and Canadian research players by involving five French laboratories (IC2MP, LEPMI, IMN, ICMCB and FEMTO-ST) and five Canadian institutes (UQTR, INRS, SFU, UBC and UoC) that will focus on the development of low-carbon hydrogen production technologies.

Keywords Low-carbon hydrogen, electrolyzers, photo(electro)catalysis, biomass conversion, system integration, renewables.

Contexte et objectifs

Les collaborations individuelles entre la France et le Canada dans le domaine de l'hydrogène sont très bien établies et ce depuis fort longtemps. De plus, les deux pays ont structuré au début des années 2020 leurs efforts de recherche dans ce domaine en créant respectivement la Fédération Hydrogène du CNRS (FRH2 n°2044) et le réseau de recherche et développement sur l'hydrogène H2CAN2.0. Or, plusieurs laboratoires de ces deux structures nouvellement formées ont une ancienne tradition de collaboration. Partant de ce constat, l'initiative de formaliser à une échelle supérieure ces collaborations existantes et de pouvoir en favoriser d'autres s'est imposée comme une évidence. Dans ce contexte, l'International Research Network « FC clean H2: Moving France and Canada to a Low-Carbon Hydrogen Future » (IRN FC clean H2) a été construit en 2023, puis accepté et financé par CNRS Chimie à partir du 1^{er} janvier 2024 pour une durée de cinq ans. Le Canada s'implique par le financement de post-doctorants et de doctorants, et de leur mobilité via le Réseau Québécois

sur l'Energie Intelligente (RQEI), le MITACS (programmes Globalink) et la Chaire de Recherche du Canada sur l'hydrogène vert (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, CRSNG) à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR).

L'IRN FC clean H2 s'appuie sur un réseau collaboratif de recherche impliquant dans son noyau dur cinq laboratoires français du CNRS (IC2MP, LEPMI, IMN, ICMCB et FEMTO-ST) appartenant à la FRH2 du CNRS (figure 1a) et cinq universités canadiennes (UQTR, INRS, UoC, UBC et SFU) appartenant au réseau stratégique de recherche et développement sur l'hydrogène du Canada H2CAN 2.0 (figure 1b). Les recherches au sein de l'IRN FC clean H2 se focalisent sur le développement de procédés de production d'hydrogène bas-carbone et se répartissent autour des cinq thèmes principaux : (i) matériaux pour l'électrolyse basse température, (ii) matériaux pour l'électrolyse haute température, (iii) matériaux pour la production d'hydrogène par photo(électro)catalyse, (iv) reformage de la biomasse (thermique et non-thermique), (v) systèmes

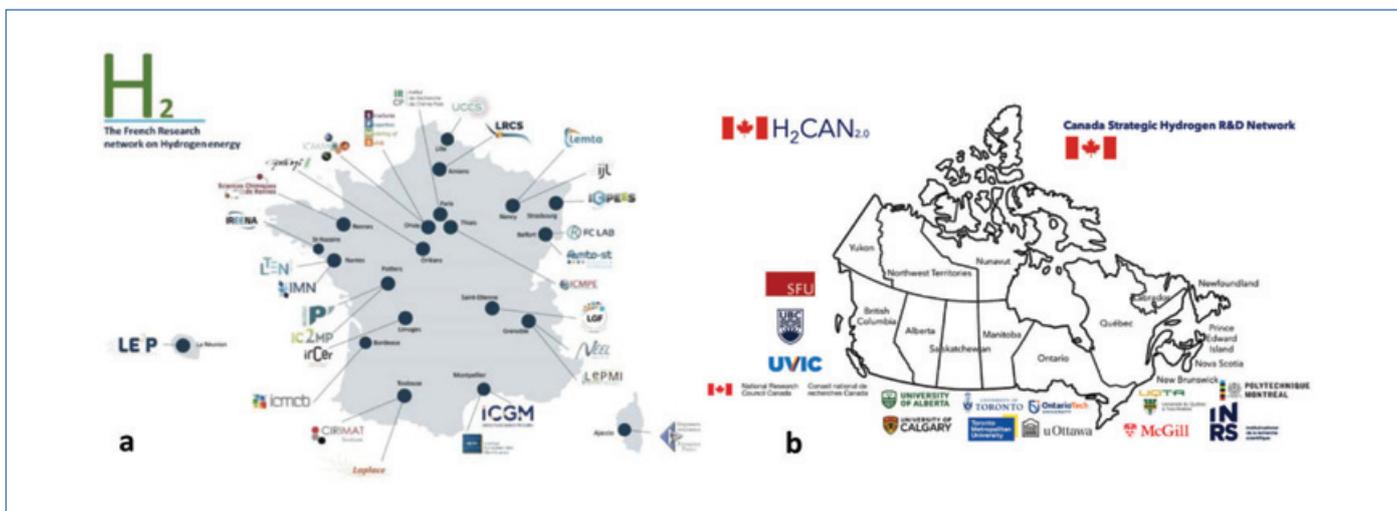


Figure 1 - (a) Fédération de Recherche Hydrogène du CNRS (FRH2 2044) ; (b) Réseau stratégique du Canada de recherche et développement sur l'hydrogène (H2CAN 2.0).

énergétiques, intégration systèmes et gestion de l'énergie. L'IRN-FC Clean H2 a pour vocation d'encourager et d'aider les chercheurs français et canadiens à prendre part à des projets communs dans le domaine de la production d'hydrogène bas-carbone.

'Combattre' le changement climatique va nécessiter une transition énergétique globale. En 2020, le secteur énergétique, incluant la production d'électricité, le transport, le chauffage, la production manufacturière, *etc.*, était responsable de plus de 70 % de l'émission mondiale de gaz à effet de serre (GES) [1]. Dans ce décompte, le transport représente environ 20 % des émissions de GES, dont environ 75 % venant des véhicules de tourisme, et ces émissions sont en constante augmentation. Atteindre la neutralité carbone et climatique impose de restreindre l'utilisation de ressources fossiles dans le secteur de l'énergie et de les remplacer par des sources d'énergie renouvelables ou d'autres combustibles ayant la plus faible empreinte carbone et climatique possible. Par conséquent, la part de la production mondiale d'électricité renouvelable doit au moins être doublée d'ici 2030 ; cet objectif permettrait déjà de décarboner largement l'électricité sur le réseau en 2030, mais l'effort devra être continué pour atteindre la neutralité climatique en 2050, et pour espérer rester dans le cadre du scénario à +2,0 °C [2]. En effet, l'augmentation significative de la part d'énergie renouvelable dans le mix énergétique permettrait aussi de rendre les secteurs économiques très consommateurs d'énergie (bâtiments, transport et industrie) plus vertueux et moins impactant sur la neutralité climatique.

Néanmoins, la transition énergétique s'accompagne de plusieurs défis qu'il faudra résoudre. Le déploiement significatif de sources d'énergie renouvelables dans le secteur électrique va nécessiter le déploiement concomitant de systèmes de stockage de l'énergie et de solutions de réseaux intelligents capables de répondre aux profils de génération variable d'électricité. Dans les secteurs industriels utilisant des procédés nécessitant de la chaleur à très hautes températures et dans la mobilité lourde (*e.g.*, camions, aviation, transport maritime), l'électrification apparaît moins efficace que des solutions thermiques alternatives climatiquement neutres ou bas-carbone. Presque toutes les analyses technoéconomiques récentes montrent que l'hydrogène est un vecteur d'énergie qui pourrait jouer un rôle essentiel pour combler le vide entre la production d'énergie et son utilisation délocalisée dans

l'espace et le temps sous forme d'électricité ou de chaleur, et résoudre les défis liés à cette transition énergétique [3]. L'hydrogène, en complément d'autres systèmes de stockage d'énergie (batteries, station de transfert d'énergie pas pompage, chaleur, *etc.*), peut servir de vecteur pour le stockage saisonnier des énergies renouvelables sous forme chimique [4] et restituer cette énergie à la demande sous forme d'électricité au sein d'une pile à hydrogène (pile à combustible) [5]. Il peut aussi être utilisé comme matière première pour les industries chimiques [6] et réactif pour les cimenteries [7], les aciéries [8] et les bioraffineries [9]. Dans les secteurs industriels nécessitant de la chaleur à hautes températures et ceux de la propulsion pour la mobilité lourde, où l'électrification n'est pas nécessairement la meilleure option énergétique, l'hydrogène peut être utilisé pour remplacer les combustibles fossiles. Sa capacité à couvrir de nombreuses applications industrielles, allant du secteur des transports, de la production d'électricité et manufacturière, à celui du bâtiment, fait de l'hydrogène un candidat incontournable pour aider la France et le Canada dans leurs efforts pour une mutation de leurs économies vers l'excellence climatique. En effet, l'utilisation de l'hydrogène, que ce soit au sein d'une pile à combustible pour produire de l'électricité ou en combustion directe pour produire de la chaleur ou de l'énergie mécanique, n'émet pas de CO₂ et ne pollue pas l'atmosphère. Il apparaît donc comme l'une des solutions pour atteindre l'objectif de la neutralité climatique en 2050 si sa production est réalisée par des procédés durables.

Dans cette optique, les recherches au sein de l'IRN FC Clean H2 se focalisent spécifiquement sur les technologies de production d'hydrogène bas-carbone à partir de ressources locales et non-fossiles. Pour maximiser le rôle de l'hydrogène dans l'objectif d'atteindre la neutralité climatique en 2050, il est nécessaire de continuer à optimiser l'efficacité de conversion des technologies de production, de réduire leurs coûts d'investissement et d'opération, d'optimiser le couplage entre sources d'énergies et systèmes de production, de former la main d'œuvre du futur et de promouvoir son appropriation technologique par la société au sens large.

La France et le Canada ont tous les ingrédients requis pour développer une économie compétitive et durable autour de l'hydrogène bas-carbone [10,11], incluant respectivement des ressources naturelles abondantes et un système de production d'électricité bas-carbone (nucléaire). À ceci s'ajoute le fait

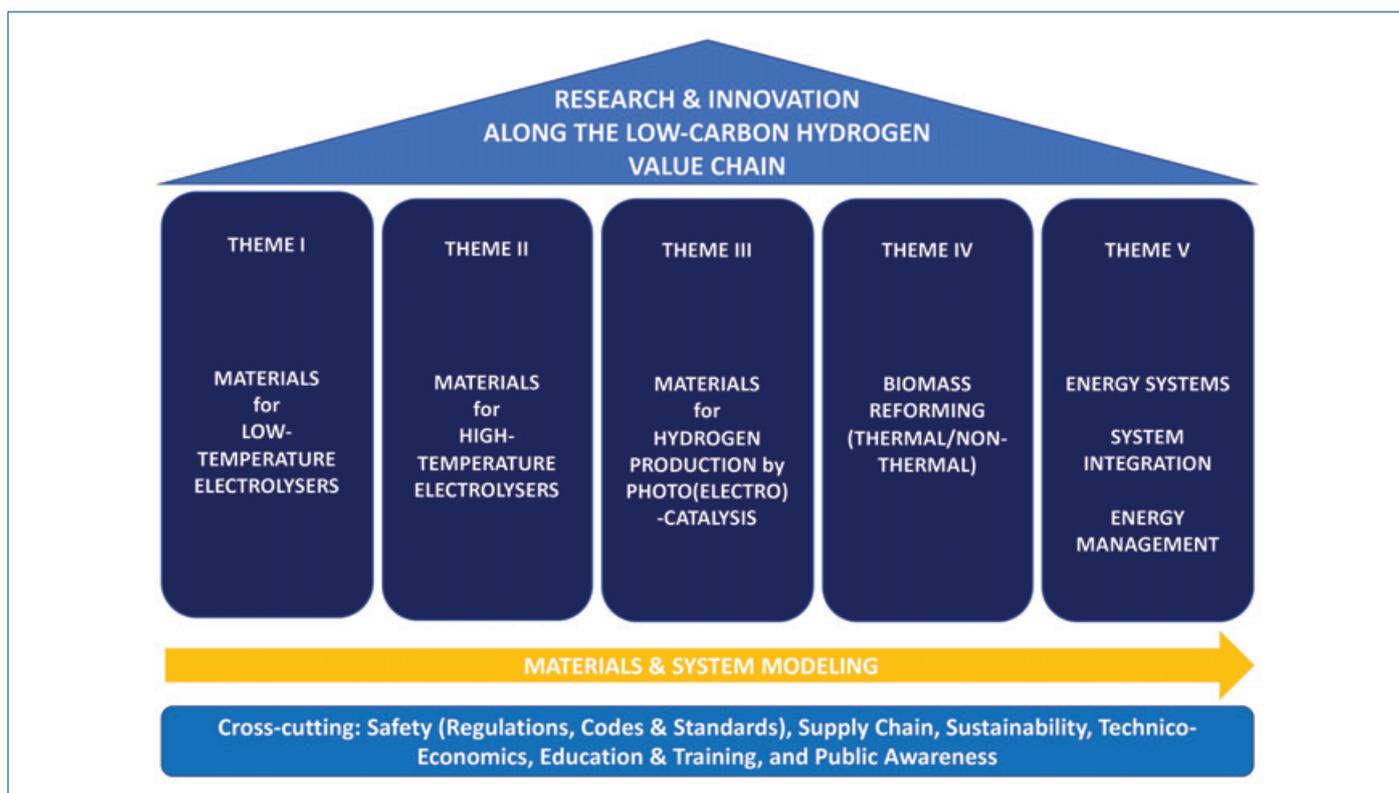


Figure 2 - Thématiques collaboratives R&D de l'IRN FC Clean H2.

que le réseau international de recherche pourra aussi compter sur l'implication de quelques-uns des meilleurs chercheurs mondiaux dans le domaine officiant au sein de la FRH2 et de H2CAN2.0.

Programme scientifique de l'IRN FC clean H2

Les défis sont nombreux et variés et impliquent donc de mutualiser les compétences de spécialistes provenant de différentes disciplines dans une perspective intersectorielle, afin de combiner les expertises pour rendre conjointement le déploiement de l'hydrogène possible et profitable dans les écosystèmes énergétiques de la France et du Canada. Dans cette optique, l'IRN FC Clean H2 vise à faire rapidement avancer des recherches sur de nouveaux matériaux et systèmes (équilibre des systèmes d'usine – Balance of Plant, BoP –, systèmes de gestion électrique – Energy Management Systems, EMS –, etc.) nécessaires au développement de technologies de production bas-coût et bas-carbone d'hydrogène, facilement accessibles et de fabrications et d'origines françaises et canadiennes. Pour atteindre ces objectifs, la stratégie de l'initiative est distribuée de manière cohérente autour de cinq thématiques scientifiques organisées en plusieurs lignes de recherche (*figure 2*), incluant les modélisations et simulations pour le développement des matériaux et de systèmes (intelligence artificielle, apprentissage automatique, théorie de la fonctionnelle de la densité, dynamique moléculaire, etc.).

Actuellement, les coûts de l'hydrogène bas-carbone (hydrogène jaune produit à partir d'énergie nucléaire et hydrogène bleu avec capture et séquestration du CO₂) et renouvelable (hydrogène vert) sont plus élevés que ceux de l'hydrogène produit à partir de ressources fossiles (hydrogène « gris ») [12]. En effet le coût de production de l'hydrogène gris est de l'ordre de 1,5 €/kg⁻¹, à comparer avec celui de l'hydrogène

renouvelable estimé entre 3 et 5,5 €/kg⁻¹ (4,4 à 8 CAD\$) [13,14,15]. La commission européenne a défini des objectifs de prix pour l'hydrogène bas-carbone à moins de 2 €/kg⁻¹ en 2030, et à moins de 1 €/kg⁻¹ en 2050. Les objectifs des États-Unis sont plus ambitieux : en juin 2021, le département Energie du gouvernement des USA préconisait une réduction des coûts à 1 US\$.kg⁻¹ sur dix ans (DoE's Earthshots [16]). Les stratégies « hydrogène » internationales s'entendent plus généralement et de manière plus raisonnable pour proposer un prix compris entre 1,50 US\$.kg⁻¹ et 3,50 US\$.kg⁻¹ en 2050 [11,15,16]. Ces objectifs imposent non seulement une augmentation significative des capacités de production d'hydrogène décarboné, mais aussi le développement de technologies de production plus efficaces et plus rentables.

Les vraies réponses à apporter aux problèmes de l'énergie et du réchauffement global imposent des solutions radicales et technologiquement exigeantes. Par conséquent, plutôt que de considérer toutes les technologies de production d'hydrogène, ou même d'énergie au sens large, l'IRN FC Clean H2 a choisi de focaliser son action sur des technologies vertes pour la production d'hydrogène. Pour cela trois piliers de développement technologique seront étudiés :

- (i) les technologies d'électrolyse de l'eau (et de la vapeur d'eau), qui représentent l'essence même de la production d'hydrogène propre lorsque la source d'électricité est renouvelable,
- (ii) la conversion de la biomasse et des déchets organiques par électroreformage ou par des technologies basées sur des procédés de conversion thermochimiques (gazéification et pyrolyses),
- (iii) les méthodes basées sur l'énergie solaire/la photosynthèse artificielle pour les comparer aux méthodes précédentes dans une vision stratégique à long terme. Ces technologies ont des niveaux de maturité différents.

Les chercheurs impliqués dans l'IRN FC Clean H2 ont déjà travaillé pendant de nombreuses années sur les verrous scientifiques et technologiques qui peuvent ralentir ou empêcher la maturation et la compétitivité de ces technologies sur le marché de l'énergie. La deuxième originalité de l'IRN FC Clean H2 réside dans la facilitation de recherches collaboratives qui se focaliseront d'un côté sur la résolution des problèmes limitant les efficacités des systèmes et procédés, et de l'autre sur la réduction des coûts des installations et des difficultés opérationnelles (barrières scientifiques et technologiques). Ainsi, l'IRN FC Clean H2 intègre une vision plus globale qui considère l'optimisation et la rationalisation de l'utilisation des ressources en matériaux, eau, biomasse et énergie (renouvelables et nucléaire) et l'intégration de ces technologies dans une approche d'économie circulaire.

L'augmentation de la part d'hydrogène produit par des méthodes électrochimiques à partir de sources d'énergie renouvelables et nucléaires va imposer que la France et le Canada investissent massivement dans la construction respectivement de barrages hydrauliques et de centrales nucléaires, et dans le déploiement plus ambitieux et rapide de systèmes de production d'énergie électrique principalement basés sur l'éolien onshore et offshore, et le photovoltaïque. BC Hydro (Canada), Hydro Québec (Canada) et EDF (France) anticipent déjà que leurs capacités actuelles de production d'électricité ne seront pas suffisantes pour atteindre les objectifs. Il est donc particulièrement important de considérer les couplages des systèmes d'électrolyse, basses et hautes températures, à la production électrique par ces sources d'énergie nucléaires ou renouvelables. Au-delà des aspects relatifs aux systèmes et à leurs intégrations dans un écosystème énergétique, des limitations ont déjà été identifiées pour certaines technologies d'électrolyse et nécessitent des recherches spécifiques pour leurs utilisations intermittentes [17,18].

Il est aussi important de souligner l'énorme impact que pourraient avoir toutes les méthodes de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire et les systèmes intégrés de photo(electro)synthèse artificielle de nouvelle génération sur la trajectoire d'un développement durable [19]. En effet,

l'hydrogène solaire peut aisément compléter le mix énergétique et répondre à des applications spécifiques qui sont difficiles à décarboner. De plus, la production directe d'hydrogène par l'énergie solaire offre l'avantage d'un stockage lui aussi direct de cette énergie, ainsi que la possibilité de se désolidariser du réseau électrique (autoconsommation). Cela pourrait être important dans un futur où la demande électrique pourra être extrêmement élevée. Le déploiement d'unités de production de tailles variées, plus locales, autonomes et adaptables permettrait alors l'alimentation électrique de communautés isolées ou de certains secteurs de l'industrie lourde (e.g., mines, ammoniac, métallurgie, etc.). Pour développer ces technologies de manière durable, les ressources naturelles et anthropiques nécessaires doivent être utilisées de manière rationnelle. En conséquence, les recherches relatives aux nouveaux matériaux nécessaires au développement de ces technologies se focaliseront sur la substitution des métaux nobles et critiques/stratégiques [20] par des éléments plus abondants et abordables. En effet, plusieurs technologies d'électrolyse de l'eau utilisent des électrodes dont les catalyseurs contiennent certains de ces métaux (iridium - Ir, ruthénium - Ru, platine - Pt, nickel - Ni, cobalt - Co, terres rares, etc.) :

- (i) l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, - PEMWE) pour Ir, Ru et Pt,
- (ii) l'électrolyse alcaline (Alkaline Water Electrolysis, - AWE) et l'électrolyse à membrane échangeuse d'anion (Anion Exchange Membrane Water Electrolysis, - AEMWE) pour Ni et Co,
- (iii) l'électrolyse à oxyde solide (Solid Oxide Electrolysis, - SOE) pour Ni, Co et certaines terres rares [21].

La figure 3 représente les éléments principaux dans les électrolyseurs (et les hydrures métalliques etc.) [21].

Ainsi, l'objectif n'est pas seulement de développer de nouveaux matériaux qui limiteraient l'utilisation d'éléments critiques/stratégiques, particulièrement les métaux du groupe du platine (platinum group metals, - PGMs), les terres rares (rare earth elements, - REEs) et d'autres métaux de transition tels que le nickel et le cobalt, mais aussi de développer des

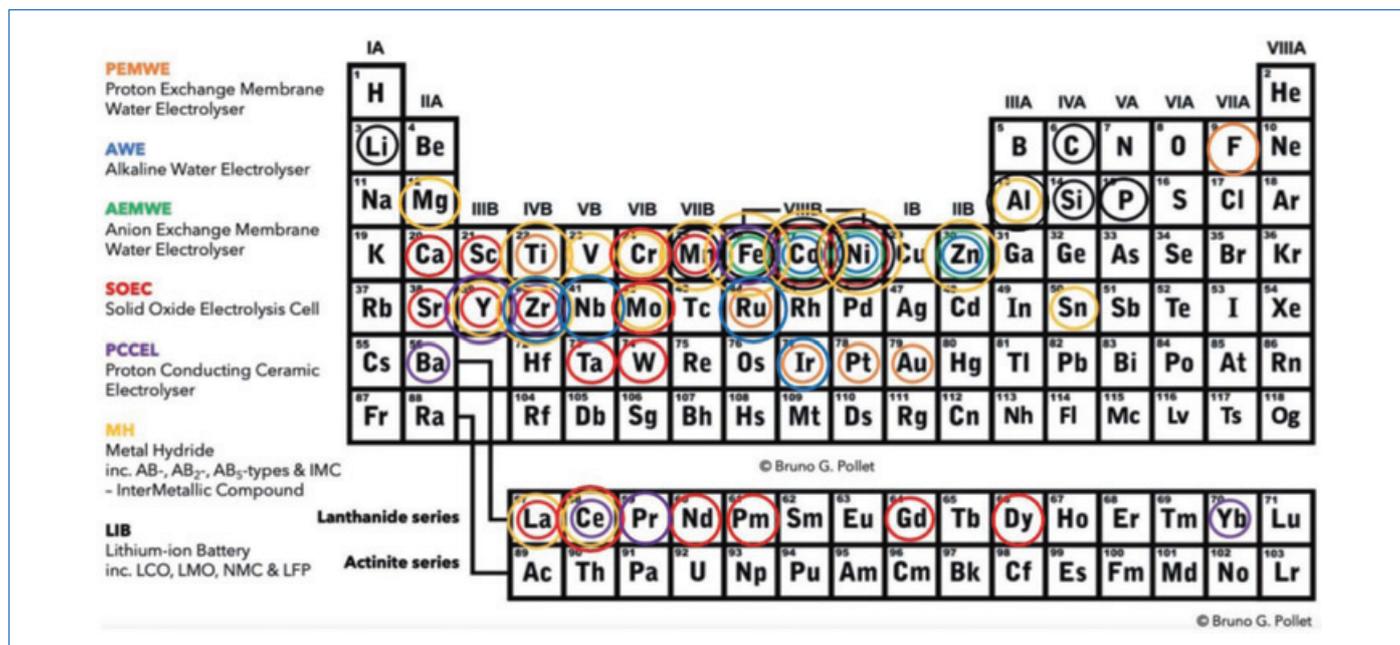


Figure 3 - Éléments principaux dans les électrolyseurs, les batteries lithium-ion et les hydrures métalliques [21].

méthodes propres de récupération/recyclage et de réutilisation de ces matériaux, en bref, de promouvoir le cycle vertueux : réduire/récupérer/recycler/réutiliser [21].

Les systèmes les plus efficaces pour la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire sont aussi basés sur l'utilisation de métaux nobles, de terres rares et autres éléments critiques [22]. Les recherches se focaliseront alors sur le développement de systèmes basés sur des métaux de transition moins onéreux et plus abondants (fer- Fe, cuivre - Cu, Ni, Co, zinc - Zn, *etc.*), aux niveaux des absorbants, photo-sensibilisants et catalyseurs. Enfin, une attention toute particulière sera de nouveau apportée à la récupération et au recyclage des métaux utilisés dans les composants de ces systèmes. Ce projet bénéficie aussi de la force du Canada et de la France en termes de réserve de métaux stratégiques, particulièrement du nickel (Canada et Nouvelle-Calédonie).

L'autre ressource importante dans ces technologies d'électrolyse est **l'eau**. La diversification des ressources en eau pour l'opération des systèmes de production d'hydrogène est primordiale pour au moins deux raisons ;

L'une est que, normalement, les électrolyseurs fonctionnent avec de l'eau très pure, ce qui augmente les coûts de production de l'hydrogène.

L'autre est qu'il pourrait y avoir compétition avec d'autres usages sur les ressources en eau.

Pour ces raisons, des recherches au sein de l'IRN vont aussi porter sur l'utilisation de ressources d'eau qui n'entrent pas en compétition avec les besoins des populations autochtones. Dans ce contexte, les possibilités d'électrolyse de l'eau de mer [23], des eaux usées, des eaux saumâtres, des eaux de glace et neige (même sales), constituent un changement de paradigme [24,25] qui impliquera des travaux orientés vers les performances et la durabilité des électrodes et des membranes dans ces conditions opératoires. En effet, il est connu que certains catalyseurs dans les technologies d'électrolyse sont très sensibles aux impuretés dans l'eau, même à l'état de traces [26]. Enfin, la disponibilité de la biomasse et des déchets de l'agriculture et de l'industrie agroalimentaire constitue le troisième axe important concernant l'utilisation rationnelle des ressources qui sera traité au sein de l'IRN FC Clean H2. La valorisation sous toutes ses formes, électrochimiques [9], photoélectrochimiques [27] et thermochimiques [28], de la biomasse et des déchets pourra rendre possible le développement d'écosystèmes régionaux énergétiques basés sur une économie circulaire. L'originalité de l'approche au sein de l'IRN se retrouve dans l'utilisation de composés issus de la biomasse non-alimentaire (cellulose, hemicellulose, lignine, *etc.*) avec l'objectif de co-produire des matériaux ou molécules avancés à base de carbone biogénique, qui d'ailleurs pourraient être aussi utilisés comme supports de catalyseurs et catalyseurs [29,30]. Tandis que la cellulose et l'hémicellulose, riches respectivement en sucres C6 et C5, pourraient être valorisés électrochimiquement, la lignine, plus complexe, serait préférentiellement traitée thermiquement. Cependant des études significatives sur la lignine, le second polymère naturel le plus important sur terre, seront dédiées à la production de biochar par pyrolyse, un composé d'importance pour les électrolyseurs du futur.

Ainsi, la valorisation et la conversion de la biomasse devront s'appuyer sur deux piliers à développer :

(i) l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement par la conception et le déploiement de centres de récupération de la biomasse et autres déchets au Canada et en France,

(ii) l'amélioration des procédés par une co-activation physique telle que les ultrasons [31] ou un plasma [32] et ceci afin d'augmenter les rendements.

Enfin, des recherches sur la conception de systèmes intégrant la production solaire d'hydrogène (ou d'autres composés chimiques) et la récupération de la biomasse et des déchets anthropiques (agriculture, agroalimentaire, déchets ménagers, *etc.*) comme matières premières pour la partie oxydation dans un système de photosynthèse artificielle seront aussi considérées.

Au-delà du développement des technologies de production d'hydrogène, un thème dédié à l'optimisation, l'intégration et le management des systèmes énergétiques est inclus dans cette initiative. Cette thématique forte se focalisera sur les problèmes de l'intégration des technologies de production à différentes échelles et à leur adaptation aux conditions et besoins locaux. Elle étudiera ces technologies de production d'hydrogène au sein d'un système énergétique utilisant l'hydrogène pour différentes applications (gaz commercialisable, combustible, stockage sous forme d'énergie chimique, réactif pour la synthèse de carburants ou de produits à valeur ajoutée, processus industriel, *etc.*). Les recherches sur la conception de systèmes pour leur intégration à la production d'hydrogène dans des lieux isolés et éloignés seront aussi considérées au sein de l'IRN.

Perspectives

La capacité de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau est intimement liée à l'utilisation et la gestion des sources d'énergie, entrant en compétition avec les autres usages de l'électricité verte nécessaire à la transition énergétique, et créant donc une pression sur le réseau de distribution. De plus, si l'objectif est de remplacer les méthodes de production traditionnelle accompagnées de fortes émissions de gaz à effet de serre par l'électrolyse, il est alors fort probable que la pression sur le réseau de distribution d'électricité s'accroisse dans les années qui viennent. Cette compétition entre technologies représente un problème sociétal très important dans un contexte où l'IEA (International Energy Agency) et l'IRENA (International Renewable Energy Agency) s'attendent à une augmentation significative de l'utilisation (et donc de la production) d'hydrogène pour atteindre le net zéro en 2050. Mais, la réduction des coûts des énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire et l'éolien, rend possible de dédier tout ou partie de la production des fermes d'électricité renouvelable à la production d'hydrogène.

L'originalité des recherches et de l'approche proposées par l'IRN FC Clean H2 garantit la réalisation de percées scientifiques et technologiques majeures dans le domaine de la production d'hydrogène bas-carbone et bas-coût avec des retombées économiques fortes non-seulement en France et au Canada, mais aussi au niveau international. Au final, cette initiative sera un exemple original d'excellente collaboration scientifique, et un modèle de partage et de progression des connaissances pour un développement durable de notre planète.

Glossaire

DoE : Department of Energy (États-Unis).

FEMTO-ST : Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies (Belfort, France).

ICMCB: Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (Bordeaux, France).

IC2MP: Institut de Chimie des Milieux et des Matériaux de Poitiers (Poitiers, France).

IMN: Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (Nantes, France).

INRS: Institut National de Recherche Scientifique (Longueuil, Québec, Canada).

IRH: Institut de Recherche sur l'Hydrogène (Trois-Rivières, Québec, Canada).

LEPMI: Laboratoire d'Électrochimie et de Physicochimie des Matériaux et de Interfaces (Grenoble, France).

UoC: University of Calgary (Calgary, Alberta, Canada).

UBC: University of British Columbia (Vancouver, Colombie Britannique, Canada).

SFU: Simon Fraser University (Vancouver, Colombie Britannique, Canada).

UQTR: Université du Québec à Trois-Rivières (Trois-Rivières, Québec, Canada).

[1] H. Ritchie, P. Rosado, M. Roser, Emissions by sector: where do greenhouse gases come from?, **2020**, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> (consulté le 23 mars 2024).

[2] IRENA, World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, **2022**, www.irena.org/publications (consulté le 23 mars 2024).

[3] The Future of Hydrogen, Report prepared by the IEA for the G20, Japan, **2020**, https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (consulté le 23 mars 2024).

[4] Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition écologique, ministre de la transition écologique et solidaire, **2018**, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf (consulté le 23 mars 2024).

[5] Fuel Cells, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, **2024**, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> (consulté le 23 mars 2024).

[6] C. Wang, S.D.C. Walsh, T. Longden, G. Palmer, I. Litalo, R. Dargaville, Optimizing renewable generation configurations of off-grid green ammonia production systems considering Haber-Bosch flexibility, *Energy Conversion and Management*, **2023**, *280*, 116790, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116790>

[7] R.S. El-Emam, K.S. Gabriel, Synergizing hydrogen and cement industries for Canada's climate plan – case study, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **2021**, *43*, p. 3151-3165, <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1936699>

[8] H2 Green Steel, Powering a new, clean industrial revolution, <https://www.h2greensteel.com/> (consulté le 25 mars 2024).

[9] C. Dollé, N. Neha, C. Coutanceau, Electrochemical hydrogen production from biomass, *Curr. Op. Electrochem*, **2022**, *31*, 100841, <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100841>

[10] France Hydrogène, A road-map for an ambitious hydrogen strategy by 2030 – part 2, <https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2023/01/NF-Executive-summary-FH-2022-EN-Web.pdf> (consulté le 25 mars 2024).

[11] Stratégie Canadienne pour l'Hydrogène: Saisir les possibilités pour l'hydrogène, https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-fr-v4.pdf (consulté le 24 mars 2024).

[12] T. Longden, F. J. Beck, F. Jotzo, R. Andrews, M. Prasad, Clean' hydrogen? – Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen, *Appl. Energ.*, **2022**, *306*, 118145, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118145>

[13] IRENA, Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, **2021**, ISBN 978-92-9260-314-4.

[14] N. Van Hulst, The clean hydrogen future has already begun, International Energy Agency, **2019**, <https://www.iea.org/commentaries/the-clean-hydrogen-future-has-already-begun> (site visité le 24 mars 2024).

[15] CITEPA, Hydrogène: La Commission adopte une Stratégie Européenne Réf.: 2020_07_a14, **2020**, https://www.citepa.org/fr/2020_07_a14/ (site visité le 24 mars 2024).

[16] U. S. Department of Energy (DoE), Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, Energy Earthshots Initiative, Hydrogen Shot, **2021**, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot> (site visité le 24 mars 2024).

[17] M. Chatenet, B.G. Pollet, D.R. Dekel, de F. Dionigi, J. Deseure, *et al.*, Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments, *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, *51*, p. 4583-4762, <https://doi.org/10.1039/d0cs01079k>

[18] S.S. Kumar, H. Lim, An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production, *Energy Reports*, **2022**, *8*, p. 13793-13813, <https://doi.org/10.1016/j.eegy.2022.10.127>

[19] DOE Explains...Solar Fuels, **2024**, <https://www.energy.gov/science/doe-explains-solar-fuels> (site visité le 24 mars 2024).

[20] M. Grohol, C. Veeh, DG GROW/European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final report, <http://doi.org/10.2873/725585>

[21] E. Eikeng, A. Makhsoos, B.G. Pollet, Review of: Critical and Strategic Raw Materials for Electrolysers, Fuel Cells, Metal Hydrides and Hydrogen Separation Technologies, *International Journal of Hydrogen Energy*, **2024**, *71*, p. 433-464.

[22] S. Carrara, S. Bobba, D. Blagoeva, P. Alves Dias, A. Cavalli, *et al.*, Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, **2023**, JRC132889, <http://doi.org/10.2760/386650> (site visité le 24 mars 2024).

[23] S. Dokhani, M. Assadi, B.G. Pollet, Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater, *International Journal of Hydrogen Energy*, **2023**, *48(26)*, p. 9592-9608.

[24] F.-Y. Gao, P.-C. Yu, M.-R. Gao, Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production : challenges and opportunities, *Curr. Opin. Chem. Engin.*, **2022**, *36*, 100827, <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100827>

[25] G. Liu, Y. Xu, T. Yang, L. Jiang, Recent advances in electrocatalysts for seawater splitting, *Nano Materials Science*, **2023**, *5*, p. 101-116, <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.12.003>

[26] D. Chauhan, Y.-H. Ahn, Alkaline electrolysis of wastewater and low-quality water, *Journal of Cleaner Production*, **2023**, *397*, 136613, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136613>

[27] H. Song, S. Luo, H. Huang, B. Deng, J. Ye, Solar-Driven Hydrogen Production: Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives, *ACS Energy Lett.*, **2022**, *7*, p. 1043-1065, <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.1c02591>

[28] J. Yao, M. Kraussler, F. Benedikt, H. Hofbauer, Techno-economic assessment of hydrogen production based on dual fluidized bed biomass steam gasification, biogas steam reforming, and alkaline water electrolysis processes, *Energy Convers. Manag.*, **2017**, *145*, p. 278-292, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.084>

[29] S. Bhattacharjee, V. Andrei, C. Pornrungroj, M. Rahaman, C. M. Pichler, E. Reisner, Reforming of Soluble Biomass and Plastic Derived Waste Using a Bias-Free Cu₃₀Pd₇₀|Perovskite|Pt Photoelectrochemical Device, *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 2109313, <https://doi.org/10.1002/adfm.202109313>

[30] E. Lam, J. H.T. Luong, Carbon Materials as Catalyst Supports and Catalysts in the Transformation of Biomass to Fuels and Chemicals, *ACS Catal.*, **2014**, *4*, p. 3393-3410, <https://doi.org/10.1021/cs5008393>

[31] E.M.M. Flores, G. Cravotto, C.A. Bizzi, D. Santos, G.D. Iop, Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products: state-of-the-art, perspectives and challenges Ultrason, *Sonochem*, **2021**, *72*, 105455, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105455>.

[30] P. Dimitrakellis, E. Delikonstantis, G.D. Stefanidis, D.G. Vlachos, Plasma technology for lignocellulosic biomass conversion toward an electrified biorefinery, *Green Chem.*, **2022**, *24*, p. 2680-2721, <https://doi.org/10.1039/D1GC03436G>

Christophe COUTANCEAU^{1*}, professeur, **Bruno G. POLLET**², professeur.

¹ Université de Poitiers/CNRS, IC2MP, FRH2, Directeur de l'IRN FC clean H2, France.

² Université du Québec à Trois-Rivières/Institut de Recherche sur l'Hydrogène, Directeur de l'IRN FC Clean H2, Canada.

*christophe.coutanceau@univ-poitiers.fr