

An example to illustrate the role of R&D in the emerging industrial hydrogen economy

Jean FOYER¹, Christophe PROUST², Matthieu PROUST³

1 : QAIROS Energies, sté GDL, Les Chênes, 72540 Mareil-en-Champagne.

2 : Laboratoire TIMR, UTC/ESCOM, Sorbonne Universités, Centre de recherche Pierre Guillaumat, 60200 Compiègne.

3 : UTEAM, Centre de Transfert, 66, avenue de Landshut, CS10154, 60201 Compiègne Cedex.

Abstract

The global warming awareness, the reduction of fossil resources, the demand for well-being of industrialized societies, geopolitical upheavals and tomorrow perhaps the biodiversity crisis are powerful drivers to foster a change in the means of production and use of energy. In this context, the idea of a "hydrogen economy" emerged at the turn of the century (Brandon and Kurban, 2017) around the relatively new notion of hydrogen as an "energy carrier". However, all concepts even if very appealing, become concrete achievements. Conditions for the emergence of an "industrial sector" (Stoffaës, 1980) need to be fulfilled, i.e. at least a viable market, robust technologies for production and use technologies and logistics. In the following, the authors attempt to illustrate the conditions for the emergence of an industrial hydrogen-energy sector, in particular the role of R&D that underpins this process. There is first a cognitive barrier. The physico-chemical properties of hydrogen are particularly well known, and means are available to produce it in large quantities (Brandon and Kurban, 2017). The risks are also known but are well under control in the industry. Socio-economic actors may find this reassuring. The second element is societal. Mature industrial sectors represent considerable fixed capital. Even if research has already shown that it would be possible to produce hydrogen differently, there is little reason for these well-established sectors to evolve without additional incentives. The societal "drivers" mentioned above (climate change, depletion of fossil resources, etc.) have prompted Europe to take increasingly restrictive measures on the consumption of fossil resources (carbon tax, anti-pollution standards). The effect is a paradigm shift, particularly for the mobility sector, which is now investing heavily in electric and hydrogen vehicles. The third element is techno-economic. If hydrogen appears as a possibility, it is because preliminary R&D work has developed key technologies: fuel cells, very high pressure tanks and created "demonstrators". But the production technologies and the supply chain need to be developed. European regulations require the provision of hydrogen (produced in a renewable way) up to 3T per day every 150 km by 2030 (European parliament; 2021), which suggests a tight network of the territory. One option is local production either through water electrolysis or biomass gasification. QAIROS Energies identified a business model that can link significant local hydrogen use to favorable agricultural conditions. Technologies are available to grow the biomass, to pyrolyze/ gasify it and to turn the gases in hydrogen (Cao et al., 2020), which offers a range of possible processes. The economic equilibrium requires that the gasification yield be 75-125 kg H₂ / ton of biomass with a minimum consumption of utilities (water, energy, consumables,...) and requires also as little residues and toxics as possible, the gas treatment costs being quickly prohibitive. Based on these constraints, QAIROS-Energies set up an R&D team aggregating skills in agronomy to select the most suitable crops, biomass pre-treatment (drying, grinding) and pyro-gasification and gas treatment. The objective is to remove the obstacles and to demonstrate the feasibility of the project. For the pyro-gasification and gas treatment steps, a pilot was quickly set up (Figure 4) showing a certain resemblance to the future industrial units, which goes beyond academic habits.

Les conditions d'émergence d'une filière industrielle H2 : le rôle de la R&D

Jean Foyer¹, Christophe Proust², Matthieu Proust³

Affiliation 1 : QAIROS Energies, sté GDL, Les Chênes, 72540 Mareil-en-Champagne.

Affiliation 2 : Laboratoire TIMR, UTC/ESCOM, Sorbonne Universités, Centre de recherche Pierre Guillaumat, 60200 Compiègne.

Affiliation 3 : UTEAM, Centre de Transfert, 66, avenue de Landshut, CS10154, 60201 Compiègne Cedex.

Contexte

La prise de conscience du réchauffement climatique, de la raréfaction des ressources fossiles, la demande de bien-être des sociétés industrialisées, les bouleversements géopolitiques et demain peut-être la réduction de la biodiversité sont des moteurs puissants pour impulser un changement des moyens de production et d'usage de l'énergie. C'est dans ce contexte qu'est apparue voici quelques décennies l'idée d'une « économie de l'hydrogène » (Brandon et Kurban, 2017) autour de la notion relativement nouvelle de l'hydrogène comme « vecteur d'énergie » (Abdin et al, 2020). Cependant, tous les concepts, si séduisants soient-ils, ne deviennent pas des réalisations concrètes auprès du public. Il faut pour cela que soient réunies les conditions d'émergence d'une « filière industrielle » (Stoffaës, 1980) c'est-à-dire au moins un marché (des usages), des technologies de production/utilisation robustes et une chaîne logistique. On tente d'illustrer dans ce qui suit les conditions d'émergence d'une filière industrielle d'hydrogène-énergie et de montrer en particulier le rôle de la R&D qui sous-tend ce processus.

Introduction

On sait que l'hydrogène est un produit largement utilisé dans l'industrie depuis au moins l'avènement de l'industrie lourde, vers le milieu du 19^e siècle. Il est traditionnellement employé dans l'industrie des engrais et le raffinage (Brandon et Kurban, 2017). Mais depuis cinquante ans environ, le terme « d'économie de l'hydrogène » a émergé dans la communauté scientifique (Bockris, 2013) et est progressivement passé de la sphère académique à la sphère industrielle. L'un des marqueurs de cette transition est la naissance, au tournant du siècle, du FCH-Joint Undertaking, un partenariat public-privé qui finance des actions de Recherche et d'Innovation (« RIA ») au niveau européen. L'objectif est, à ce niveau supra-national comme aux autres (nationaux et régionaux), de soutenir l'innovation de manière à aider les concepts issus de la recherche académique à passer dans des applications utilisables.

On pourrait dire aujourd'hui que le sujet suscite un réel intérêt sociétal en ce que tous les acteurs usagers-chercheurs-industriels-financeurs-autorités se sentent désormais concernés et, dans l'ensemble, les esprits sont prêts.

Ce dernier point est une condition essentielle pour réussir la transformation d'une innovation dans le domaine de l'hydrogène énergie en une application mais n'est pas la seule. On essaye d'étayer ce point ci-après et on l'illustre ensuite à travers le développement -en cours- d'une installation industrielle de fourniture d'hydrogène.

Quelques éléments du succès ?

Que tous les acteurs considèrent désormais l'émergence d'une économie de l'hydrogène de façon ouverte est la condition essentielle. Il est intéressant de constater que les précurseurs des années soixante-dix avançaient un argument de santé publique (pollution de l'air) pour justifier leur idée d'une économie de l'hydrogène dans laquelle l'hydrogène serait un vecteur d'énergie. C'était un argument de spécialistes, de chercheurs. Mais, depuis, ce constat a essaimé dans toutes les strates des sociétés industrielles et s'est enrichi d'une prise de conscience du réchauffement climatique et de la raréfaction des ressources fossiles. Ceci, associé aux bouleversements géopolitiques et demain peut-être à l'effondrement de la biodiversité, est un moteur puissant pour impulser un changement notamment dans les moyens de production et d'usage de l'énergie. Sans la communauté scientifique, cette prise de conscience n'aurait pas eu lieu et l'idée qu'il est possible de développer une économie de l'hydrogène n'aurait pas germé.

La fait que l'hydrogène soit un produit abondant et bien connu a certainement joué favorablement. On connaît particulièrement bien ses propriétés physico-chimiques et on sait le produire en grandes quantités. Il a été possible aussi de passer au-delà de la peur de l'accident (le syndrome du Hindenburg) en montrant que, malgré la sévérité des accidents potentiels, la sinistralité reste maîtrisée (Proust, 2019). Les acteurs socio-économiques peuvent trouver dans tout cela un aspect rassurant.

A contrario, les filières industrielles matures représentent un capital immobilisé considérable. Même si la recherche a déjà montré qu'il serait possible de produire et d'utiliser l'hydrogène dans de très nombreux domaines (cf ci-après), il y a peu de raisons que ces filières bien installées évoluent sans incitations supplémentaires tant elles sont complexes et les marchés souvent volatils. Dans ce contexte un peu bloqué, les « drivers » sociétaux évoqués précédemment (changement climatique, épuisement des ressources fossiles, ...) sont employés par l'Europe qui impose des mesures de plus en plus restrictives sur la consommation de ressources fossiles (comme la taxe carbone et les normes anti-pollution de plus en plus strictes). Progressivement, un changement de paradigme se met en place notamment pour le secteur de la mobilité qui investit désormais massivement dans les véhicules électriques et hydrogène. C'est le domaine de l'action politique.

Au-delà des arguments socio politiques, il existe un élément technico-économique. Si l'hydrogène apparaît comme une possibilité sérieuse, c'est que des travaux de R&D ont mis au point des technologies clés : piles à combustible (Manoharan et al., 2020), réservoirs très haute pression (Zhang et al., 2019) et créé les « démonstrateurs » (Ulleberg, 2007) autour. Mais actuellement, la France consomme 1Mt d'hydrogène par an pour ses usages internes. Une flotte de 5 M de véhicules légers consommerait environ 1 Mt supplémentaire ce qui nécessite un très fort développement des moyens de production de l'hydrogène et de la chaîne logistique (stockage, transport). La vision européenne propose (European parliament; 2021) une mise à disposition de l'hydrogène (produit de manière renouvelable) à hauteur de 2t par jour tous les 150 km à l'horizon 2030 ce qui suggère un maillage serré du territoire. Cela ouvre la porte à une production locale d'hydrogène soit à travers l'électrolyse de l'eau, soit grâce à la gazéification de biomasse (Woodrow et Rifkin, 2006) ce qui permet de simplifier l'aspect logistique.

Aussi favorable et nécessaire que semble être ce substrat, cela ne suffit pas pour faire passer la « vallée de la mort » à un concept éprouvé (Figure 1 d'après Markam S.K. et al., 2010), c'est-à-dire d'une application utilisable à une application utilisée ou encore passer vers l'industrialisation/commercialisation.

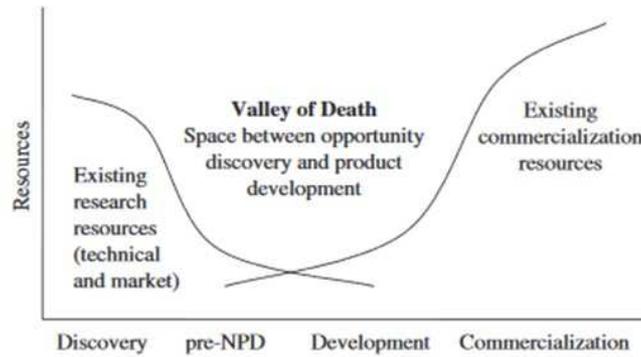


Figure 1 : représentation de la « vallée de la mort (d'après Markam et al., 2010)

Les états ont multiplié les structures pour favoriser le transfert de la recherche publique vers l'applicatif (incubateurs, SATT, ...) mais relativement peu de structures créées dans l'incubateur franchissent le cap des 5 ans (Bessières V. et al., 2014). Les raisons sont une difficulté à réunir des financements et les compétences nécessaires pour accompagner la croissance. On pourrait ajouter un dernier élément que Bessières et ses collègues ne semblent pas évoquer est la nécessité de s'insérer dans une « filière industrielle » (Stoffaës, 1980) c'est-à-dire d'intégrer une chaîne de partenaires qui va du marché (des usages), aux technologies de production/utilisation et via une chaîne logistique. Il ne suffit donc pas de s'assurer d'un marché, de posséder la meilleure technologie sur un maillon de la chaîne, ni même les moyens humains et financiers, il faut aussi s'assurer des ressources et des moyens d'acheminement. Une multitude de partenaires à entraîner donc. Markam semble résumer la dynamique à mettre en œuvre dans le graphe suivant (Figure 2). Le « champion » désigne le groupe qui émet l'idée, développe le concept et produit les « business cases ». Il est l'avocat et doit convaincre les financeurs (« sponsor ») pour démontrer la viabilité de l'innovation. Les « gatekeepers » ouvrent l'accès au marché en fournissant un accès aux ressources et au marché. Markam insiste sur le fait ses acteurs doivent interagir simultanément et non séquentiellement.

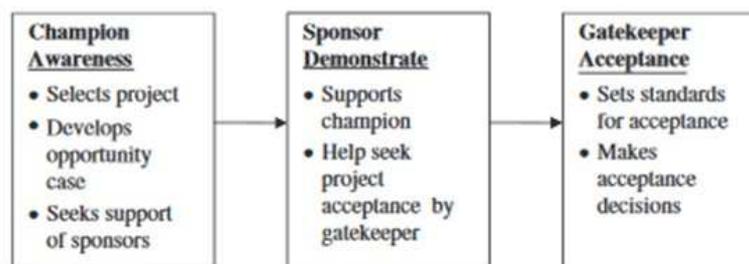


Figure 2 : groupe d'acteurs dans un projet d'innovation (d'après Markam et al., 2010)

On devine à tous ces niveaux et à toutes ces étapes la marque de la recherche, plus fondamentale dans les sphères socio-politiques et de plus en plus appliquée et tournée vers l'innovation à mesure que l'application pratique se fait jour. Or les chercheurs de la communauté du Génie des Procédés ont pour vocation de faire émerger des solutions pratiques. On tente d'illustrer dans les paragraphes qui suivent comment la recherche en Génie des Procédés peut accompagner le développement de la filière hydrogène énergie notamment à travers cette phase difficile de la « vallée de la mort ».

L'exemple de QAIROS Energies

Le secteur de l'énergie est en effervescence et de nouveaux acteurs apparaissent. QAIROS Energies est une entreprise fondée en 2019 par un ingénieur en génie des procédés. C'est « l'alignement des

astres », entre le besoin de décarboner les mobilités et les contraintes environnementales, spécifiquement dans le monde rural, qui ont créé les conditions de l'émergence de QAIROS Energies. Le fondateur, appuyé par des associés financeurs, a rassemblé une équipe d'experts (du monde agricole, de la sécurité, des procédés, de la chimie) afin de proposer un concept de site industriel de production de gaz renouvelables basé sur l'usage de co-produits agricoles. Les recherches ont notamment de valider le lieu de l'implantation du premier site, un démonstrateur expérimental à l'échelle 1, à savoir la métropole du Mans, qui veut se positionner comme le carrefour des mobilités décarbonées et du monde rural.

Après une analyse précise du secteur et de ses difficultés, QAIROS Energies a décidé d'inscrire son projet dans une logique d'économie circulaire, et s'est orienté vers une production et une consommation locale d'hydrogène. Le circuit court est une façon de limiter les difficultés transport/stockage et l'échelon local permet d'ajouter des leviers relativement à l'aménagement du territoire. Ce point est important parce que les autorités jouent un rôle important dans le déploiement du secteur de l'énergie. Elles sont sensibles à la circularité, à la protection de l'environnement et au développement locales de richesses. Ce sont à la fois des « gatekeepers » et des « sponsors ».

En tant que « champion », QAIROS Energies doit trouver des ressources locales, des clients locaux et montrer la faisabilité du projet (techniquement, économiquement, environnementalement). La recherche et développement est alors largement convoquée.

L'idée fondatrice est de développer un procédé pour transformer une ressource locale, agricole, en hydrogène utilisable dans des véhicules utilitaires comme les autobus de la communauté de commune. Pour obtenir un rendement suffisant, une technique de pyro-gazéification doit être mise en œuvre. Il en existe de nombreuses dont les performances et la complexité sont variables (par exemple Cao et al., 2020). L'équilibre économique impose que le rendement de gazéification soit de 75-125 kg H₂/tonne de biomasse avec une consommation d'utilités (eau, énergie, consommables, ...) minimale mais aussi peu de déchets et de toxiques que possible, les coûts de traitement étant rapidement prohibitifs. Sachant les performances moyennes des dispositifs existants, le défi est significatif. Pour le relever QAIROS Energies mobilise des ressources de la recherche en agronomie, en chimie et en génie des procédés. L'UTC en particulier a été sollicité pour son expérience des procédés de pyro-gazéification et chimie (Diedhou et al., 2019, Liu et al., 2015) mais aussi en sécurité (Duclos A., 2019) qui est l'une des clés de l'acceptation du projet par les autorités.

Pour les opérateurs de la recherche, il s'agissait d'abord de trouver le couple procédé/biomasse adéquat, d'en évaluer les performances, de participer à la conception de procédé, de développer une métrologie industrielle et de communiquer/former.

La première étape était de sélectionner la biomasse candidate. Utiliser un déchet agro forestier ne donne pas forcément de bons résultats tant la qualité des produits de pyrolyse est dégradée rendant la performance globale décevante (un exemple est donné ci-après). Par ailleurs, les résidus agricoles ont des usages concurrents bien établis. Il ne s'agit pas que la biomasse candidate entre en concurrence avec les autres usages. La biomasse candidate doit pouvoir être facilement gazéifiée avec le moins de résidus possibles et idéalement s'inscrire harmonieusement dans le cycle agricole. Les travaux de recherche conduits en lien avec l'INRAE et l'IMMM notamment ont permis d'identifier une biomasse agricole présentant suffisamment d'avantages agronomiques, écologiques et économiques, n'impactant pas les cultures vivrières en s'intégrant dans les rotations se cultures (pour augmenter la diversification et les apports d'azotes naturels au champ). Une biomasse fibreuse, robuste, relativement traditionnelle en Europe, à croissance rapide, et utilisable en culture intermédiaire a été sélectionnée.

La seconde était de mettre au point une technique de pyrogazéification qui tire le meilleur potentiel de cette biomasse. On a ainsi mis au point (Figure 3) un système d'injection de cette biomasse préalablement broyée et un principe de gazéification flash à haute température (>1000°C et vitesse de chauffe >1000°C/s) permettant d'obtenir des rendements de production de gaz bien supérieures aux techniques conventionnelles (<1000°C et vitesse de chauffe <100°C/s) tout en diminuant les nocifs (suies notamment et goudrons).

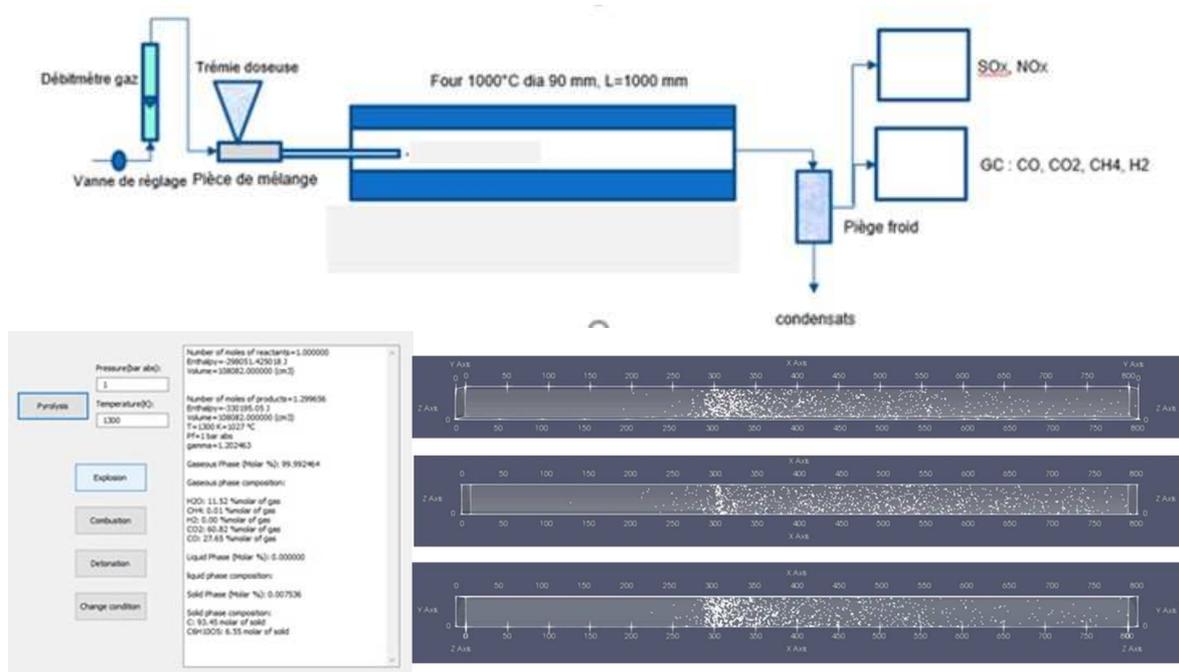


Figure 3 : étapes de conception (haut), de simulation thermochimique (bas-gauche) et de mécanique des fluides (bas-droite)

Dès cette étape, on a pris soin de choisir et d'adapter des techniques robustes pour implémenter cette nouvelle façon de faire. Il s'agissait de limiter la complexité de l'installation, pour faciliter le pilotage d'une part, et d'autre part pour limiter les risques aux yeux des financeurs et des autorités. Les principales innovations résident dans le conditionnement et le processus d'introduction de la biomasse dans le four. Par ailleurs, dès le début, une prise en compte des risques procédés et industriel a été instruite sur la base d'un schéma procédé relativement classique. Une stratégie de maîtrise a été définie de conserve avec les autorités. Un procédé en totale rupture aurait posé de sérieuses difficultés dès ce stade.

A partir de ce travail préliminaire, un pilote de laboratoire a été construit (Figure 4) pour reproduire les principales étapes de la gazéification, y compris les températures, les temps de séjour et les vitesses de chauffe. Il était important pour les sponsors que ces paramètres de base soient explorés. L'installation ressemble, en modèle très réduit, à l'installation industrielle. C'est un four tubulaire de 90 mm de diamètre interne, dont la longueur de chauffe est de 600 mm, qui peut fonctionner à flux continu sous débit de gaz azote de 3 Nm³/h et de poudre de biomasse de 5 à 20 g/mn). Les gaz sont prélevés à la sortie du four et acheminés vers une métrologie en ligne de type industriel (Xstream pour CO, CO₂, H₂, CH₄ et O₂ et Horiba PG250 pour SO_x et NO_x). Un piégeage des suies/cendres éventuelles et de l'eau est assuré par barbotage dans de l'isopropanol en amont de la mesure des gaz. La quantité d'eau est ensuite déterminée par la méthode de Karl-Fisher. Des contrôles ont été faits indépendamment par chromatographie gazeuse. Cet agencement, outre qu'il permet de réaliser les

essais dans les conditions requises, offre la possibilité de se projeter vers l'installation réelle en identifiant par avance les performances mais aussi les limites.



Figure 4 : pilote « pyroflash » mis au point à l'UTC

On a exploré les effets de la température, de la vitesse de chauffe, du gaz environnant pendant la pyrolyse et de la nature de la biomasse. Les essais (Figure 5) ont permis de vérifier que l'objectif principal d'augmentation du volume de gaz produit et de réduction des nocifs (suires surtout et NOx) était largement atteint (tableau 1) pour une biomasse assez représentative (l'amidon du commerce) tandis que l'usage de résidus agro forestiers (résidus de luzerne) ne pourrait convenir. Il se confirme donc que la nature de la biomasse est d'une grande importance.

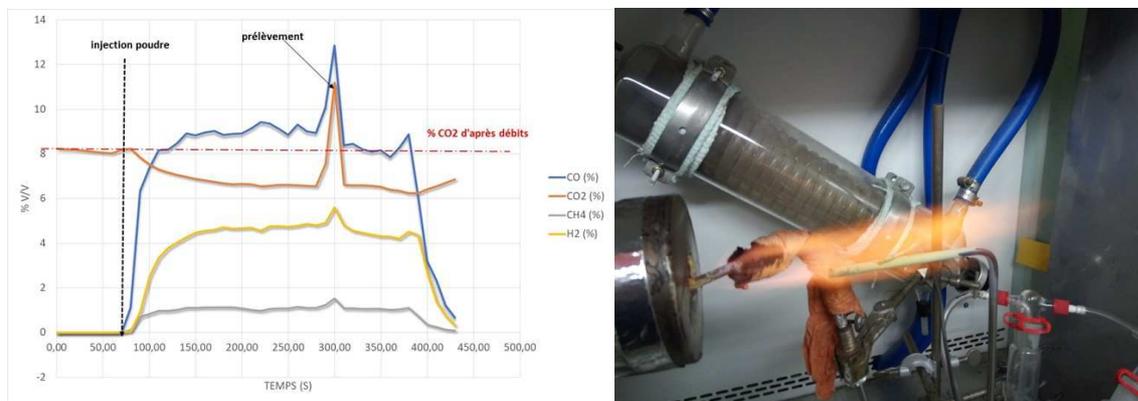


Figure 5 : exemple de pyrolyse d'un échantillon d'amidon de laboratoire (analyse des gaz en continu à gauche et flamme de diffusion en sortie à droite)

Tableau 1 : exemple de résultats pour deux biomasses

Biomasse	Rendement de gazéification kg gaz/kg biomasse	Nm ³ (CH ₄ +CO+H ₂)/kg biomasse	Potentiel d'H ₂ après traitement en kg/t biomasse	Commentaires
Modèle : amidon	0,8 à 1	1,1	103	Pas de suies dans les gaz mais de la cendre dans le four. Pas de NO _x , peu de SO ₂ . Gazéification quasi complète (aux cendres près)
Résidu : luzerne	0,3 à 0,4	0,35	30	Beaucoup de suies dans les gaz. Présence de NO _x et de SO ₂ .

A ce stade, il est fort utile de s'assurer que les équipements industriels existants pourront atteindre la performance voulue. Quelques tests à l'échelle réelle (en dimension, réacteur de plusieurs mètres, et en durée, quelques jours de pyro-gazéification) ont été réalisés chez un fabricant de réacteurs industriels qui ont démontré la faisabilité du couplage biomasse-procédé. Ces essais sont couverts par le secret mais il convient de souligner que les travaux sur « pyroflash » ont été tout à fait indispensables pour l'interprétation des données de ces essais.

A partir de ce point, des choix technologiques ont été faits par QAIROS Energies et les travaux suivants avaient pour objet d'accompagner le développement de l'installation finale. Au-delà des activités d'ingénierie de traitement des effluents (dimensionnement opéré à partir des mesures précédentes en laboratoire), il est important de pouvoir caractériser la biomasse avant son introduction dans le procédé. Or, si le pilote « pyroflash » a bien permis de tester des options relatives au procédé à employer et de confirmer/orienter vers certaines biomasses plutôt que vers d'autres, la mise en œuvre d'un essai avec ce pilote est relativement coûteuse en temps et en niveau d'expertise. On a alors mis au point un banc d'essai simple à utiliser dans un laboratoire industriel (Figure 6). L'installation, totalement originale a permis non seulement de reproduire très précisément les volume gazeux mesuré sur « pyroflash » mais aussi d'étudier l'effet de la variabilité saisonnière de la biomasse.

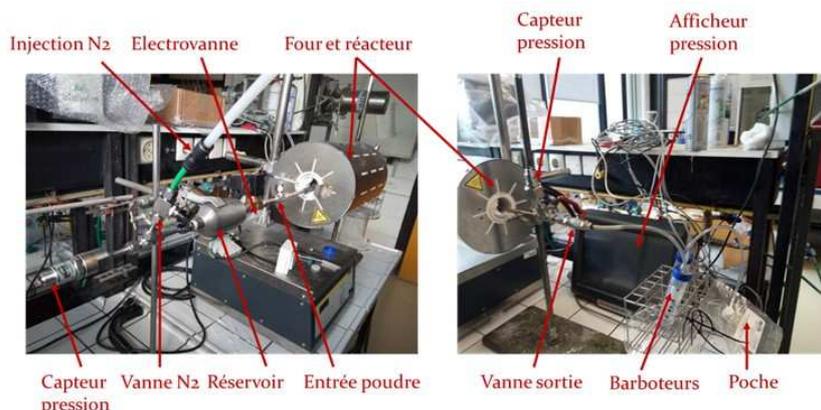


Figure 6 : banc d'essais pour la caractérisation du pouvoir gazogène d'une biomasse pulvérisée

On cherche désormais à valoriser les travaux réalisés jusqu'à présent à la fois sous une forme scientifique et technique et à la fois sous une forme plus industrielle avec la constitution d'une sorte de jumeau numérique de l'installation de pyrolyse et de traitement des gaz et avec un reformatage des installations d'essais à des fins de démonstration et d'enseignement (Figure 7).



Figure 7 : installation des bancs d'essais dans une halle de démonstration R&D (non ouverte au public)

L'histoire continue à s'écrire à partir de ces moyens. On s'interroge en particulier sur la possibilité d'associer une étape de méthanation ou encore sur la possibilité de piéger le carbone de la plante ce qui reviendrait à implémenter un bilan carbone ... négatif.

Conclusion

On montre dans cet article, qu'au-delà des objectifs purement scientifiques et techniques, les opérations de R&D permettent de crédibiliser la démarche de demande de soutien par les acteurs socio-économiques si les conditions de développement de la nouvelle filière sont réunies comme exposé ci-dessus. Il est préférable alors que les pilotes présentent une certaine ressemblance avec les futures unités industrielles, ce qui va parfois au-delà des habitudes académiques. Pour l'économie de l'hydrogène en particulier, la question de la maîtrise du risque est par ailleurs systématiquement abordée, presque à toutes les étapes du projet. QAIROS Energies a très tôt abordé le sujet avec les acteurs socio-économique (DREAL). Cet aspect est pris en compte pour le prédimensionnement de l'installation et a des implications assez importantes.

Références bibliographiques

- Abdin, Z.; Zafaranloo, A.; Rafiee, A.; Mérida, W.; Lipinski, W.; Khalilpour, K.R., Hydrogen as an energy vector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120, 109620.
- Bessière, V.; Gomez-Breyse, M.; Gonnard, S.; Messeghem, K.; Sammut, S.; Accompagnement de l'innovation: retour sur dix ans d'expérience, *revue Entreprendre et Innover*, 2014, 2, 53-65
- Brandon, N.P.; Kurban, Z., Clean Energy and the Hydrogen Economy, *Phil. Trans. R. Soc.*, 2017, A375, 20160400.
- Bockris, J.O.M.; The hydrogen economy: its history, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, 38, 2579-2588
- Cao, L.; Yu, I.K.M.; Xiong, X.; Tsang, D.C.W.; Zhang, S.; Clark, J.H., Ng, Y.H.; Shang, J.; Ok, Y.S., Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects, *Environmental Research*, 2020, 186, 109547.
- Diedhou, A.; Ndiaye, L.-G.; Bensakhria, A.; Sock, O.; Thermochemical conversion of cashew nut shells, palm nut shells and peanut shells char with CO₂ and/or steam to aliment a clay brick firing unit. *Renewable Energy*, 2019, 142, 581-590.

Duclos, A.; Développement et mise au point de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion pour la filière émergente hydrogène-énergie, *Thèse de doctorat de l'Université de Compiègne*, 2019

European Parliament, Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council, COM/2021/559 final

Liu, Q; Proust, C; Len, C.; Luart, D.; Gomez, F.; Applied numerical chemistry in process engineering R&D, *Abstract book of the 10th European Congress of Chemical Engineering (ECCE 10)*. 2015, 1127

Manoharan, Y.; Hosseini, S.E.; Butler, B.; Alzhahrani, H., Fou Senior, B.T.; Ashuri, T.; Krohn, J., Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect, *Appl. Sci.*, 2019, 9, 2296.

Markham, SK.; Ward, SJ.; Aiman-Smith, L.; Kingon, AI; The valley of death as context for role theory in product innovation, *J. Product Innovation Management*, 2010, 27, 402-417

Proust,C., Fire and explosion safety in hydrogen containing processes : state of the art and outstanding questions, ISFEH09 symposium, 2019, Saint Peterburg, Russia.

Stoffaës, C., Politique industrielle et filières, *Revue d'économie industrielle*, 1980, 13, pp. 86-99.

Ulleberg, Ø.; Ito, H.; Maack, M. H.; Ridell, B.; Miles, S.; Kelly, N.; Iacobazzi, A.; del Pilar Argumosa, M.; Schoenung, S.; Stewart, E., Hydrogen Demonstration Project Evaluations: FINAL REPORT for IEA – International Energy Agency HIA – Hydrogen Implementing Agreement Task 18: Integrated Systems Evaluation Subtask B: Demonstration Project Evaluations, 2007.

Woodrow, W.C.; Rifkin, J., a green Hydrogen Economy, *Energy Policy*, 2006, 30, pp. 2630-2639.

Zhang, M.; Lu, H.; Kang, K.; Zhou, W.; Zhang, C., A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, 44, pp. 25777-25799.