

IL Y A DIX ANS DANS LA REVUE

L'économie de l'hydrogène est-elle définitivement enterrée ? Dix ans après

Nuno Bento*

Dix ans se sont écoulés depuis la publication de l'article «L'économie de l'hydrogène est-elle définitivement enterrée?». L'article soutenait que l'hydrogène avait encore du potentiel malgré les faux départs, en raison des dernières avancées technologiques, mais, pour beaucoup d'esprits à l'époque, la messe était dite. Depuis, la situation a évolué et l'hydrogène fait aujourd'hui partie d'un nombre croissant de plans et de scénarios pour l'avenir de compagnies privées et de gouvernements, mais d'une façon que l'on n'envisageait pas il y a une décennie. Quelles sont les raisons de ce regain d'intérêt pour l'hydrogène? Sommes-nous en présence d'un changement de fond ou bien d'un nouveau phénomène de mode? Les réponses à ces interrogations passent par la compréhension de deux autres questions : quelle est la situation actuelle de cette technologie et qu'est-ce qui a changé en dix ans?

Le contexte a évolué et exige une réponse rapide au problème du changement climatique. En présence de phénomènes naturels extrêmes devenus plus fréquents et d'une pression publique montante, un nombre croissant de gouvernements adoptent des mesures climatiques, allant au point de déclarer l'urgence climatique (symboliquement) à l'instar du Parlement européen. L'Accord de Paris et le rapport spécial du GIEC de 2018 ont montré l'importance d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 pour limiter l'augmentation des températures à 1,5 °C¹. Ce défi exige des changements profonds dans tous les domaines d'activités, particulièrement dans les secteurs où l'électrification (encore faudra-t-il que celle-ci soit décarbonée!) demeure plus difficile à instaurer tels que le transport de longue distance (routier, maritime ou aérien), l'industrie sidérurgique et chimique et la production de chaleur pour l'industrie et pour les bâtiments. En effet, l'hydrogène est une des options

(parfois rares) pour la décarbonation profonde de ces secteurs. Enfin, et du côté de l'offre, la chute des coûts de production de l'énergie solaire et éolienne a contribué à rendre plus compétitive la production de l'hydrogène «vert» sans émissions de gaz polluants.

Le regain d'intérêt après désillusion est toujours incertain et dépend des facteurs technologiques. Il est connu que le progrès des innovations technologiques émergentes n'est pas linéaire, mais alterne plutôt entre des périodes d'euphorie avec des attentes exagérées et des périodes creuses marquées par des anticipations très pessimistes. Certaines technologies pâtissent même de ce désenchantement, comme ce fut le cas des lunettes Google avec réalité augmentée ou bien des carburants synthétiques pour remplacer le pétrole aux États-Unis. Mais d'autres technologies entrent dans une période moins visible de progrès incrémentaux, mais réels, qui rendent ces innovations progressivement plus compétitives et prêtes pour la commercialisation. Alors, beaucoup de technologies émergentes suivent leur

* Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), DINAMIA'CET (cf. biographies p. 80).

courbe de maturité et améliorent leurs performances et coûts pour atteindre le marché [2].

Des améliorations graduées ont été enregistrées dans les technologies d'hydrogène et piles à combustible (PAC). Cependant, on reste loin des avancées drastiques qui étaient nécessaires à la dissémination de l'hydrogène, surtout dans les usages mobiles (Tableau 1).

Dans le transport, les technologies de l'hydrogène ont connu des progrès incrémentaux mais insuffisants au cours de la décennie écoulée. Certes, l'efficience des PAC a progressé et atteint presque 60 %, mais elle reste encore inférieure à 65 %, l'objectif pour la commercialisation

en 2020. Plus important, les systèmes de PAC restent quatre fois plus chers que l'objectif de commercialisation, à moins que la production annuelle passe à 500 000 unités par an, ce qui dégagerait des économies d'échelle suffisantes pour réduire le coût des piles. Le stockage d'hydrogène (par exemple, embarqué à haute pression (700 bar) pour emmagasiner une quantité suffisante (5 kg) de ce gaz pour parcourir 500 km) doit diviser son coût par deux aux conditions actuelles de production. Malgré ces progrès limités, le nombre de voitures PAC et de stations d'hydrogène en opération a augmenté jusqu'à quelque 12 000 voitures et 430 stations (Tableau 2), surtout après 2015. Cependant, ces chiffres restent loin des

Technologie		Unités	2010	2015	2020	Objectif
Transport	Coût de l'hydrogène à la pompe – non taxé	\$/kg	3-9	2,75-12,9	1,2-6	4
	Stockage de l'hydrogène à bord	\$/kWh	15-18 (60)	15-19 (23)	15 (23)	10
	Coût du système PAC PEM	\$/kW	60 (500)	51 (230)	45 (180)	40
	Efficacité énergétique PAC	%	53-58	53-59	57-60	65
	Durabilité	heures	2000	2521	3 800	5 000
Stationnaire (< 10 kW)	Durabilité	heures		12 000-70 000	12 000-70 000	1 000-80 000
	Coût des systèmes PAC	\$/kW		2 300-2 800	(30 000)	1 500
	Efficacité PAC	% (PCI)		34-40		> 45
	dont CHP	% (PCI)		80-90		90

Tableau 1. Évolution et objectifs de coûts pour les technologies de pile à combustible pour les transports et les usages stationnaires

Sources : (4), (9-12), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-stationary-combined-heat-and-power> (dernier accès 11/03/2020)

Entre parenthèses, coûts associés à la production des quantités actuelles. Sinon, les coûts assument une production annuelle de 500 000 unités.

(unités)	2010	2015	2020
Portable¹	6800	8700	3900
Stationnaire²			
	4 500	180 000	275 000
Transport³			
Bus	103	100	500
Voitures	217	450	12 900
Chariots élévateurs	7 500	10 000	25 000
Stations-service⁴			
États-Unis & Canada	103	185	432
Europe	70	67	74
Asie	15	74	177
	18	44	178

Tableau 2. Évolution du nombre de piles à combustible en opération par usage et de stations-service entre 2010 et 2020

1. livraison annuelle. Rapports annuels de Fuel Cell Today (2008-2013) et E4tech (2018, 2019).

2. [4], [9], [13].

3. [4-6], [9], [14], [15].

4. [6], [16], <https://www.h2stations.org> (dernier accès 10/03/2020).

500 000 voitures et 2 500 stations qui étaient envisagés pour 2020 (Tableau 3). Et surtout, cela contraste avec l'évolution spectaculaire de la voiture électrique à batterie qui représente aujourd'hui 0,4 % du parc mondial de voitures [4]. La voiture électrique a tellement évolué que son autonomie et son confort rivalisent désormais directement avec ceux de la voiture à hydrogène (celle-ci était comparée à la voiture hybride rechargeable auparavant [5-6]). Si ce progrès doit limiter le potentiel de croissance de la voiture à hydrogène dans le futur [6], la voiture électrique peine encore à satisfaire les demandes pour une autonomie (réelle!) supérieure à 500 km. En outre, le succès des

modèles électriques plus chers montre que le prix élevé ne sera pas un grand obstacle à l'adoption de la voiture PAC à hydrogène dans les marchés hauts de gamme.

La demande initiale pour les PAC dans le transport est surtout venue de marchés de niche, principalement des chariots élévateurs avec plus de 25 000 unités en opération actuellement. L'absence de bruit lors du fonctionnement et la vitesse de recharge ont conféré un avantage concurrentiel aux piles par rapport aux autres alternatives zéro émission telles que les batteries. Moins prévisible, on constate le développement de l'hydrogène dans les nouveaux marchés de niche. D'abord, le train est un marché en croissance avec deux trains Alstom équipés de PAC à hydrogène roulant déjà en Basse-Saxe (Allemagne) et quelques dizaines déjà commandées. À noter aussi les 8 bus à hydrogène en opération depuis le début de l'année à Pau. Les Fébus sont un mixte entre le bus et le tramway avec un coût estimé à 1,8 million d'euros chacun [7], soit une fraction du coût d'une rame de tramway. Plus généralement, dans l'avenir, l'hydrogène semble avoir un potentiel de croissance dans les transports «lourds» (à contraster avec le véhicule léger) de personnes et de marchandises, surtout lorsque l'électrification est difficile et l'infrastructure plus centralisée. Par exemple, l'hydrogène peut trouver un marché pour fournir de la mobilité de qualité et propre dans les voies ferrées encore non électrifiées qui composent un peu moins de la moitié du réseau ferroviaire en France et en Allemagne [3].

Les applications stationnaires ont été le principal moteur de croissance des piles à combustible. Malgré le focus général sur les transports, la technologie est plus avancée dans les applications stationnaires et se rapproche plus vite des objectifs de commercialisation de coûts, durabilité et efficience (Tableau 1). Ce marché représente autour de 50 000 unités par an (Figure 1), il est principalement tiré par la demande de petits systèmes de cogénération (micro CHP, pour *micro combined heat and power*), allant jusqu'à 1 kW, du programme japonais Ene-Farm. Ce programme a soutenu

Unités	2020		Ambitions pour 2020		Ambitions pour 2030	
	Voitures	Stations	Voitures	Stations	Voitures	Stations
Europe	1 418	169	400 000	2 000	–	745
Japon	2 926	100	100 000	160	800 000	320
Corée	900	14	50 000	100	630 000	310
États-Unis	5 917	63	20 000	100	1 000 000	1 000
Chine	1 791	15	5 000	100	1 000 000	1 000

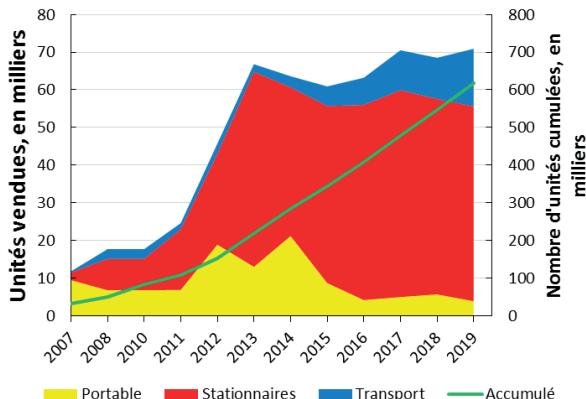
Tableau 3. Comparaison du nombre de voitures PAC et de stations en opération avec les objectifs des initiatives nationales

Source: [4-5], [15-17]

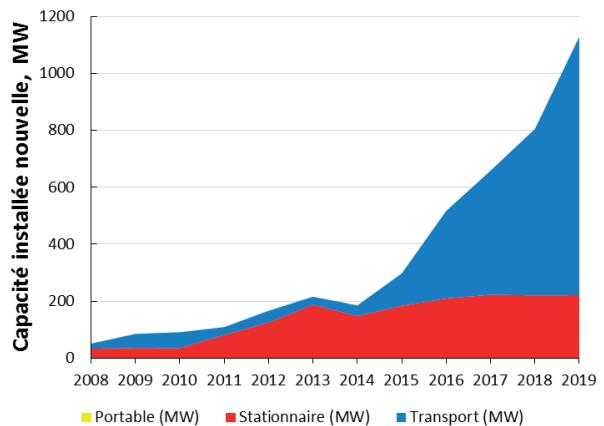
le déploiement de 275 000 piles à combustible alimentées par gaz naturel [4]. Entre temps, le prix des piles (PEM) est passé de 35 000 \$ à 9 000 \$, soit une division par quatre du prix initial pendant une décennie [8]. En revanche, les applications portables (jouets, démos, gadgets militaires, etc.) ne se sont pas développées comme attendu et leur poids est passé de presque 40 % des ventes globales de PAC en 2010 à 5 % seulement en 2019 (Figure 1).

Alors, vrai changement ou mode? Une vision différente de l'économie de l'hydrogène émerge actuellement. Cette vision est plus systémique, ralliant une plus grande diversité d'applications dans différents secteurs (énergie, transport, industrie, etc.). Ainsi, plusieurs tendances sont à suivre dans les prochaines années. Tout d'abord, il sera important d'accompagner le comportement des technologies concurrentes dans les différentes applications et de trouver comment l'hydrogène peut avoir des débouchés «captifs» dans les secteurs nécessitant de décarboner rapidement leurs activités tels que l'industrie lourde (e.g. chimique, sidérurgie, ciment) et le transport de longue distance de personnes et de marchandises.

Aussi, il s'agit de comprendre dans quelle mesure la montée de la part des énergies renouvelables intermittentes va créer des opportunités pour l'hydrogène comme solution pour le stockage et pour la production abordable d'hydrogène «vert». Du côté de l'offre, quelques interrogations demeurent sur la façon dont la hausse des ventes permettra de dégager des économies d'échelle et des économies d'apprentissage, et par ce biais la réduction de coûts nécessaire à l'élargissement des marchés initiaux. Autre incertitude : dans quelle mesure les piles à combustible continueront d'évoluer et iront confirmer dans la pratique leurs promesses de durabilité, efficience et coût. Il faudra encore suivre le comportement des entreprises des secteurs les plus touchés par la politique climatique et qui traditionnellement sont actifs dans le domaine de l'hydrogène, telles que les entreprises liées au pétrole et gaz, les électriciens ou les constructeurs automobile. Si ces derniers peuvent jouer le pari du «tout électrique» pour s'adapter au changement de réglementation (ou éviter la réglementation comme dans le passé), les entreprises gazières et pétrolières peuvent voir dans l'hydrogène une porte de sortie pour le redéploiement



(a) unités vendues



(b) capacité installée

Figure 1. Livraisons annuelles de piles à combustible par type en termes d'unités vendues (a) et capacité installée (b)

des infrastructures (gazoducs, gisements en production, réseaux de stations-service, etc.) qui autrement deviendraient obsolètes et échouées, ce qui mettrait en péril leur propre survie. Les électriciens, quant à eux, peuvent voir l'hydrogène comme une opportunité pour le stockage d'énergie (y compris entre les saisons de l'année), ainsi que pour diversifier leurs activités de fourniture d'énergie dans les secteurs où l'électrification reste plus difficile tels que la production de chaleur dans l'industrie lourde ou dans le secteur résidentiel.

Dans un contexte incertain, les gouvernements doivent promouvoir la diversité technologique et éviter de figer les trajectoires. Les politiques publiques auront un rôle important à jouer dans l'avenir de l'hydrogène. Tout d'abord, dans la mise en place d'une véritable politique de neutralité carbone qui accélère la transition vers des technologies plus propres. Par ailleurs, les pouvoirs publics devraient tirer des leçons du succès de la diffusion des stations de micro-cogénération (micro CHP) PAC au Japon avec des centaines de milliers d'unités déjà installées. Le soutien stable à la

demande a eu d'énormes retombées pour le développement de la technologie et du marché, ainsi que pour l'environnement et l'efficience du système. D'ailleurs, le focus sur les solutions pour la réduction de la demande d'énergie peut générer des effets très positifs pour la mitigation du changement climatique. Une étude a montré que pour chaque unité d'énergie économisée grâce à l'efficacité dans l'utilisation finale d'énergie, 3,2 unités de ressource énergétique primaire sont épargnées (en évitant les pertes dans les cascades successives de la chaîne de conversion d'énergie) [1]. De plus, les infrastructures sont nécessaires pour le développement de la demande dans certains usages tels que les transports. Les politiques doivent soutenir l'infrastructure initiale, suivant des critères économiques et aussi environnementaux. En particulier, le rythme de déploiement doit être ajusté; il doit éviter au maximum le surinvestissement qui reste «oisif» pour longtemps, ce qui engendre des surcoûts à l'instar de ce qui s'est passé avec la mise en place des premières bornes de chargement de la voiture électrique. Il se peut que l'utilisation des infrastructures existantes rende

le démarrage initial plus rapide au moindre coût. Par exemple, la production excédentaire d'hydrogène dans les raffineries qui est ensuite rejeté dans l'atmosphère pourrait alimenter 180 millions de voitures [4]. De même, la capture et la séquestration de carbone (CCS dans son acronyme en anglais) peut être pertinente lorsque l'infrastructure fossile est importante (production, transport, raffinage, etc.) et que l'électricité d'origine renouvelable reste chère. Mais les risques de blocage aux carburants fossiles doivent être évalués. Enfin, le soutien public aux nouvelles technologies de production d'hydrogène doit prendre en compte les externalités (e.g. production d'hydrogène «vert» à partir de l'électrolyse de l'énergie renouvelable), ainsi que les retombées non appropriables par les promoteurs dans le cas des projets avec capture et séquestration de carbone. Cependant, l'expérience du passé décourage le passage rapide à des projets de démonstration à grande échelle (CCS ou autre), impliquant des risques technologiques, économiques et d'acceptation sociale trop importants [18]. En bref, les gouvernements feraient mieux d'adopter une approche plus pragmatique en commençant par viser l'augmentation de l'efficacité énergétique. Ils devraient tirer des leçons des surprises positives des 10 dernières années et promouvoir la diversité technologique, en laissant ouverte la possibilité de développement de différents types de technologies de production et d'usages de l'hydrogène.

RÉFÉRENCES

- [1] De Stercke S. (2014). Dynamics of Energy Systems: a Useful Perspective. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA): Laxenburg, Austria.
- [2] Fenn, J., & Raskino, M. (2008). Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time. Harvard Business Press.
- [3] European Commission (2016). Electrified railway lines. Mobility and Transport, https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/share-electrified-railway_en (dernier accès 11/03/2020).
- [4] IEA (2019). The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. International Energy Agency, IEA/OECD, Paris.
- [5] IEA (2015). Technology roadmap-hydrogen and fuel cells. International Energy Agency, IEA/OECD, Paris.
- [6] Bento, N. (2010). Dynamic competition between plug-in hybrid and hydrogen fuel cell vehicles for personal transportation. International journal of hydrogen energy, 35(20), 11271-11283.
- [7] *Le Parisien* (2020). «Pau : le lancement du Fébus, le bus hydrogène, plombé par la grève». 16/12/2019.
- [8] Nagashima, M. (2018). Japan's Hydrogen Strategy and its Economic and Geopolitical Implications (pp. 12-75). IFRI.
- [9] Bento, N. (2010). «L'économie de l'hydrogène est-elle définitivement enterrée?», *La Revue de l'Énergie*, (594), 91.
- [10] US DOE (United States Department of Energy) (2019). Fuel Cell R&D Overview. 2019 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Washington, DC, www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review19/plenary_fuel_cell_papageorgopoulos_2019.pdf
- [11] Kurtz, J. M., Sprik, S., Saur, G., & Onorato, S. (2019). Fuel Cell Electric Vehicle Durability and Fuel Cell Performance (No. NREL/TP-5400-73011). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73011.pdf>
- [12] Saur, G., Kurtz, J. M., Dinh, H. N., Ainscough, C. D., & Onorato, S. (2018). State-of-the-art fuel cell voltage durability and cost status: 2018 composite data products (No. NREL/PR-5400-71642). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71642.pdf>
- [13] IPHE (2016). IPHE Joins in Celebrating Hydrogen and Fuel Cell Day. IPHE Press Release, October 8, International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, Brussels.

- [14] E4tech (2016). The Fuel Cell Industry review 2016. November. <http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2016.pdf>.
- [15] AFC TCP (2019). Survey on the Number of Fuel Cell Electric Vehicles, Hydrogen Refuelling Stations and Targets. https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2019-04_AFC_TCP_survey_status_FCEV_2018.pdf
- [16] Bento, N. (2016). Investment in the infrastructure for hydrogen passenger cars — New hype or reality?. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 379-409). Woodhead Publishing.
- [17] AFC TCP (2017). Closer look at the deployment of fuel cell EVs as of Dec. 2017. http://ieafuelcell.com/fileadmin/publications/AFC_TCP_survey_status_FCEV_2017.pdf
- [18] Wilson C., Grubler A., Bento N., Healey S., De Stercke S., Zimm C. (2020), "Granular Energy Technologies for Accelerating Low-Carbon Transformation," *Science* 368 (Issue 6486), 3 April 2020.

NOTES

1. En effet, 195 pays signataires de l'Accord de Paris de 2015 s'étaient déjà engagés à réduire leurs émissions polluantes de façon à atteindre la neutralité carbone au cours du siècle pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C. Le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2018 est venu souligner l'importance d'atteindre la neutralité carbone de toutes les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050 de façon à stabiliser l'augmentation des températures à 1,5 °C. Selon les projections du GIEC, cet objectif est possible seulement avec le déploiement de technologies à émissions négatives (dites BECCS (*Bio-energy with carbon capture and storage*) dans leur acronyme en anglais, pour l'utilisation de bioénergie avec capture et séquestration de carbone) qui demeurent à un état expérimental, ou bien à travers de profonds changements des modes de production et d'usage des services énergétiques (transports, confort thermique, manufacture de biens de consommation, etc.).