

Quelles politiques publiques pour la filière hydrogène ? Les enseignements tirés du cas des bus urbains

Les notes de l'IPP

n°55

Juin 2020

Guy Meunier
Jean-Pierre Ponsard

www.ipp.eu

La filière hydrogène est une alternative possible au moteur thermique, aux côtés des véhicules à batterie, dans la perspective de réduire les émissions de gaz à effets de serre associées aux activités de transport. Les coûts associés aux véhicules à hydrogène sont actuellement élevés, même au regard des émissions de gaz à effet de serre et de polluants évitées par leur utilisation. Une diminution des coûts associés aux véhicules à hydrogène, déterminant de leur désirabilité sociale et environnementale, se heurte pourtant à des difficultés de deux ordres. D'une part un coût de recharge élevé, où le problème de la coordination entre développement de la flotte de véhicules et infrastructure de recharge est crucial. D'autre part, des prix d'achat élevés, susceptibles de diminuer grâce à des quantités suffisantes générant des effets d'expérience. Cette note argue que chacun de ces deux handicaps appellent une politique publique structurée à un niveau spécifique : un niveau local pour la coordination entre acteurs, et un niveau européen pour générer des volumes suffisants. L'exemple des bus urbains à hydrogène offre une illustration parlante de ces problématiques.

- La montée en puissance de la filière hydrogène est encouragée par diverses initiatives en France. Ces initiatives reposent sur la notion d'écosystème régional : autour d'une ville, d'une communauté de collectivités locales, voire d'un département ou d'une région.
- L'exemple des bus à hydrogène montre que les coûts d'abattements induits par cette technologie sont encore trop élevés. Le problème réside à la fois dans le prix des véhicules et dans la fourniture du combustible.
- Faire diminuer les coûts associés à la fourniture du combustible nécessite la résolution de problèmes de coordination liés aux effets de réseau, ce qui appelle une réponse au niveau local.
- Atteindre des prix d'achats de véhicules suffisamment bas pour être compétitifs nécessite une approche européenne, qui seule permet d'atteindre un niveau significatif de volumes.



La filière hydrogène en France

Depuis le milieu des années 2010, les initiatives françaises pour développer la filière hydrogène dans les transports se sont multipliées. Celles-ci sont majoritairement le fait de collectivités locales, comme pour le projet Easymob dans la Manche, ou plus récemment, les projets de développement annoncés par la métropole de Dijon¹. Dans le même temps, le 1er juin 2018, Nicolas Hulot avait présenté un plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique.² Ce plan donnait une impulsion nationale à une série d'initiatives soutenues par les industriels du secteur.³

La filière hydrogène entend répondre à deux objectifs généraux des pouvoirs publics : lutter contre le changement climatique au niveau global en réduisant les émissions du secteur des transports, responsable de 37% des émissions de CO₂ en 2017 en France, et lutter contre la pollution urbaine, source de morts prématurés et de maladies respiratoires associées aux émissions de NO_x et de particules fines (OECD, 2016).⁴

La capacité des véhicules à hydrogène à répondre à ces deux objectifs repose sur les caractéristiques de cette technologie. Un véhicule à hydrogène comporte trois éléments : un réservoir à haute pression, une pile à combustible qui transforme l'hydrogène stockée en électricité et un moteur électrique. Son usage n'émet ainsi que de la vapeur d'eau, à l'inverse des moteurs thermiques, qui émettent des gaz à effets de serre (GES) et des polluants. L'impact environnemental d'un véhicule à hydrogène dépend donc en grande partie des émissions de GES et de polluants liées à la production de l'hydrogène. Celle-

1. Le projet EasHyMob prévoyait 15 stations et 250 véhicules à l'horizon fin 2018; le déploiement se focalisait sur des véhicules utilitaires légers

<http://erh2-bretagne.over-blog.com/2014/03/08-03-2014-premiers-pas-vers-un-reseau-europeen-de-bus-hydrogene.html>

La métropole de Dijon a annoncé en avril 2020 son intention de faire rouler à l'hydrogène bus et véhicules de collecte des ordures <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/dijon-veut-faire-rouler-ses-bus-et-ses-camions-a-l-hydrogene-1194392>

L'association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPA) tient à jour la carte des différents projets <https://www.vi-ghy-afhy-pac.org/>

2. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_depl_oiement_hydrogene.pdf

3. Lors du Forum économique mondial de Davos en 2017, The Hydrogen Council a lancé "a global initiative of leading energy, transport and industry companies with a united vision and long-term ambition for hydrogen to foster the energy transition".

4. Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759#tableau-fi-gure1>

Cette part était de 31 % en 2000, et a augmenté dans les vingt dernières années car les émissions totales ont diminué plus fortement que celles des transports. Pour une analyse plus complète voir http://www.chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2019/11/publication2019-past-trends-in-transport-co2-emissions-france_bigo.pdf

ci peut être totalement décarbonée si elle s'appuie sur l'électrolyse. En effet, l'électrolyse est une technique de production qui repose essentiellement sur l'énergie électrique : si l'électricité utilisée est issue de sources d'énergies renouvelables⁵, les émissions associées au transport à hydrogène sont très faibles.

Les véhicules électriques à batterie sont une autre alternative aux moteurs thermiques, qui répondent également aux deux enjeux environnementaux (GES et pollution). Les véhicules à hydrogène, à l'heure actuelle, présentent des coûts plus élevés et un besoin d'une infrastructure pour la production et la livraison d'hydrogène décarbonée. Dans ces conditions la capacité des véhicules à hydrogène à constituer une alternative aux véhicules à moteur thermique reste incertaine et controversée, même si ce type de véhicules offre des avantages comparatifs en termes d'autonomie, de temps de recharge et de robustesse aux conditions climatiques extrêmes.

Cette note met en évidence que la réponse sous la forme d'écosystèmes régionaux encouragée en France ne peut être qu'un point de départ à condition d'être accompagnée par une politique industrielle au niveau européen. Elle s'appuie principalement sur le cas des bus urbains.

Le secteur des bus urbains

L'Ademe (Bénita et Fayolle, 2018) note que 86% des liaisons urbaines en France se font par bus. Le parc de bus est constitué pour 68% par des bus standard de 12 m, leur nombre s'élevait en 2016 à 26 545 dont 4 573 détenus par la RATP. Un bus urbain parcourt en moyenne 40 000 km par an⁶. Au niveau européen, il y aurait environ 100 000 bus circulant dans les 75 villes les plus importantes.⁷

La décarbonation des liaisons urbaines par bus s'appuie sur deux technologies de bus électriques : à hydrogène et à batterie.

Le Tableau 1 donne une estimation en €/km du Coût Total de Possession (CTP) pour trois technologies pour un bus standard à partir de plusieurs sources (Ballard, 2019; Roland Berger GmbH, 2015; Aber, 2016; Eudy et Post, 2019). Pour un bus à hydrogène ce coût est de 5,53 €/km, pour un bus à batterie il est de 4,97 €/km alors qu'il n'est que de 3,96 €/km pour un bus diesel. Il s'agit à chaque fois de la somme des coûts associés au capital immobilisé, à la maintenance, au frais de personnel et au combustible. Les différentes composantes, pour un bus roulant 40 000

5. En 2019, selon RTE, le mix électrique français est constitué de 71% d'énergie nucléaire, 21% d'énergies renouvelables (hydraulique compris) et 8% d'énergies fossiles.

https://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan-electrique-2019_0.pdf

6. Voir aussi <https://afdc.energy.gov/data/widgets/10309>

7. <https://www.globalmasstransit.net/report/Europe-Bus-Report-market-outlook-Part-1-2017.pdf>

Tableau 1 – Comparaison coût total de possession (CTP) des bus à hydrogène, à batterie ou diesel

	Hydrogène	Batterie	Diesel
1. Capital immobilisé	1,71	1,23	0,55
Prix d'achat correspondant (€)	650 000	470 000	210 000
2. Maintenance	0,40	0,80	0,30
3. Frais de personnel	2,63	2,63	2,63
4. Fuel	0,80	0,31	0,48
soit Prix unitaire (kg H2, kWh, l)	10,00	0,24	0,30
Consommation au km	0,08	1,30	0,30
Total 1+2+3+4	5,53	4,97	3,96

Lecture : Le coût de possession des bus à hydrogène, de 5,53 €/km, est la somme d'une composante de capital immobilisé, de 1,7 €/km (ce qui correspond au prix d'achat moyen de 650 000 euros, annualisé), d'un coût de maintenance de 0,40 €/km, de frais de personnel s'élevant à 2,63 €/km, et d'un coût de combustible de 0,80 €/km (qui est le produit du prix unitaire de l'hydrogène, soit 10 €/kg, et de la consommation d'un bus à hydrogène, de 0,08 kg/km).

Sources : Ce tableau s'appuie sur les données recueillies dans l'étude de référence, (Meunier, Moulin, Ponssard, 2019) sur la base de rapports spécialisés et d'entretiens auprès de professionnels.

km par an, sont calculées de la manière suivante :

- Le prix d'acquisition est annualisé sur la base d'une durée de vie de 12 ans et d'un taux d'actualisation de 4,5% correspondant au taux préconisé pour les investissements publics en France (Quinet, 2013)⁸
- Les coûts de maintenance correspondent à des coûts variables spécifiques par technologie pour des opérations liées à l'âge du véhicule.
- Les frais de personnel dépendent peu de la technologie et n'interviennent donc pas dans la comparaison même s'ils s'ajoutent pour obtenir le CTP.
- Les dépenses de combustible sont calculées en fonction d'un prix unitaire de l'énergie et de la consommation énergétique au km.

Pour évaluer la pertinence pour la réduction des émissions de CO2 de la substitution d'une technologie émettrice (bus diesel) par une autre moins émettrice (bus électrique), l'analyse économique fait couramment référence au "coût d'abattement". Celui-ci mesure l'écart de coûts entre une technologie de référence (typiquement, une énergie fossile) et une autre, ramené aux émissions de GES évitées par l'emploi de cette technologie, mesurées en tonnes d'équivalents CO2 (Baker, Clarke et Shittu, 2008)⁹ :

$$CA = \frac{\text{Coût}_{\text{propre}} - \text{Coût}_{\text{fossile}}}{\text{CO2}_{\text{fossile}} - \text{CO2}_{\text{propre}}}$$

Cette notion représente ainsi le coût additionnel engendré par l'évitement d'une unité d'émissions de GES. Exprimé en €/tCO2, il peut alors être comparé avec des valeurs de références du coût social du CO2. Le rapport

8. A partir du prix d'achat (investissement) P le coût annualisé ca en €/an s'obtient par la formule suivante : $ca = P \frac{1-\delta}{1-\delta T}$ avec $\delta = \frac{1}{1+r}$ le facteur d'escompte, r le taux d'intérêt, et T la durée de vie de l'investissement. Avec $r = 4,5\%$, $T = 12$, et $P = 650000$ on obtient 68 213 €/an que l'on divise par 40 000 km/an pour obtenir 1,7 €/km.

9. Les coûts d'abattement tels que calculés en pratique peuvent soulever des difficultés en présence d'effets d'expérience (Creti et al., 2018).

Quinet (2019) en propose plusieurs valeurs pour la stratégie française en matière de réduction des émissions de CO2 : 87 €/tCO2 en 2020, 250 €/tCO2 en 2030, et 750 €/tCO2 en 2050¹⁰.

Cependant, l'intérêt d'une substitution des bus diesel par des bus électriques à hydrogène ou à batterie dépend des coûts, des émissions de CO2 évitées mais également de la diminution de la pollution locale. La pollution locale (principalement NOx et particules fines) a un impact sur la santé et il est possible de chiffrer son coût social. Le rapport Quinet (2013) donne des ordres de grandeur pour les bus diesel en fonction de la zone concernée (urbaine, banlieue) et de la densité correspondante d'habitants. Ce coût social "local" s'ajoute au coût du fuel pour les bus diesel. Le coût de 0,48 €/km doit ainsi être augmenté de 0,27 €/km pour les zones urbaines dites denses et de 1,36 €/km pour les zones très denses. Ceci signifie que dans les zones urbaines denses, les coûts sociaux engendrés par la circulation d'un bus diesel en termes de pollution (et donc de santé publique, de bien-être) excèdent les coûts directs liés à la circulation du bus.

Ceux-ci n'émettant pas de polluants, la circulation des bus électriques, à hydrogène ou à batterie, n'engendre pas de coûts sociaux locaux. Il est ainsi possible de recalculer le coût d'abattement des bus électriques à batterie ou à hydrogène en incluant l'effet de ces coûts additionnels pour l'usage des bus diesel, selon la formule modifiée suivante :

$$CA_{\text{avec coût social}} = \frac{\text{Coût}_{\text{propre}} - (\text{Coût}_{\text{fossile}} + \text{Coût}_{\text{social local}})}{(\text{CO2}_{\text{fossile}} - \text{CO2}_{\text{propre}})}$$

Le Tableau 2 présente les différentes valeurs du coût d'abattement des bus à hydrogène et à batterie, avec et sans prise en compte du coût social local, et pour différentes valeurs de celui-ci. En plus des données sur les coûts (présentées dans le Tableau 1), il est également nécessaire de faire des hypothèses sur les émissions de CO2 associées aux différentes technologies considérées. En ce qui concerne les bus à hydrogène, ces hypothèses concernent la production du combustible. Nous retenons deux hypothèses relatives au procédé de production de l'hydrogène : par réformage du méthane (Colonne 1) ou par électrolyse (Colonne 2). Le premier procédé émet du CO2 alors que le second en émet en fonction des émissions de GES associées à l'électricité utilisée. Nous faisons ici l'hypothèse que celle-ci est décarbonée et n'émet donc pas de CO2, tandis que le procédé de réformage génère indirectement 320 g CO2/km. En ce qui concerne les bus à batterie, les hypothèses concernent la production

10. Dans le rapport Quinet (2019) la trajectoire de coût social du CO2 (ou "valeur tutélaire du carbone") est calculée pour remplir l'objectif de neutralité carbone en 2050 avec une contrainte de budget carbone. Il existe d'autres (trajectoires de) valeurs de référence telles que celles calculées par Nordhaus (2017) avec un modèle mondial de l'économie couplé à un modèle climatique.

d'électricité. Nous retenons également deux hypothèses : soit une électricité décarbonée (Colonne 4), soit une électricité provenant du mix énergétique européen (Colonne 3)¹¹ ; dans ce dernier cas les émissions indirectes sont de 720 gCO₂/km. Les émissions de GES associées à la circulation d'un bus diesel sont d'environ 1 200 gCO₂/km.

Tableau 2 – Coût d'abattement pour un bus hydrogène et un bus électrique vs un bus diesel

	Hydrogène		Batterie	
	Réformage	Electrolyse	Mix européen	Mix décarboné
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Coût social considéré</i>				
Aucun	1 789	1 312	2 113	845
Urbain dense	1 484	1 089	1 554	622
Urbain très dense	248	182	-712	-285

Lecture : En 2020, le coût d'abattement d'un bus à hydrogène dont le combustible est produit par réformage, sans prise en compte du coût social local, est de 1 789 €/tCO₂. Il est de -285 €/tCO₂ pour un bus électrique à batterie dont l'électricité est produite par un mix décarboné et avec prise en compte d'un coût social local correspondant à un environnement urbain très dense.

Sources : Ce tableau s'appuie sur les données recueillies dans l'étude de référence, (Meunier, Moulin, Ponsard, 2019) sur la base de rapports spécialisés et d'entretiens auprès de professionnels.

La lecture du tableau 2 appelle plusieurs commentaires. Premièrement, sans prise en compte du coût social local, les coûts d'abattement sont très élevés, à plus de 845 €/tCO₂, c'est-à-dire en dehors de l'épure même pour une valeur tutélaire du CO₂ en 2050 selon Quinet (2019). Ceci signifie que les émissions de GES évitées par le choix de faire circuler un bus électrique plutôt qu'un bus diesel ne compensent pas les différences de coûts totaux de possession entre ces deux technologies.

Deuxièmement, la question du mode de production de l'énergie nécessaire à la circulation des bus électriques est particulièrement importante, puisqu'elle rend les bus à batterie plus attractifs que les bus à hydrogène lorsque la production électrique est très décarbonée, mais moins attractifs lorsqu'elle ne l'est pas.

Troisièmement, la prise en compte du coût social local a des effets très importants sur les coûts d'abattement des deux technologies électriques. Dans les cadres urbains très denses, les coûts d'abattement des bus à hydrogène et des bus à batterie sont ainsi inférieurs à 250 €/tCO₂, soit la "valeur tutélaire" du carbone suggérée par Quinet (2019) pour 2030, les coûts d'abattement des bus à batterie devenant même négatifs¹².

11. Le mix électrique français est plutôt décarboné, mais les réseaux électriques en Europe étant interconnectés, le mix électrique réel correspondant au développement des véhicules électriques, et donc les émissions de CO₂ associées, est incertain. Les deux valeurs considérées dans le tableau peuvent cependant servir de repères utiles.

12. Des coûts d'abattement négatifs indiquent que la substitution est profitable en l'absence d'un prix du carbone. Le fait que le même coût social local soit rapporté à des réductions d'émissions différentes (le dénominateur du coût d'abattement) explique que son impact est différent selon les technologies et d'autant plus grand que les baisses d'émissions sont petites. Ainsi, le bus à batterie avec le mix-européen, qui est la tech-

Cette première analyse fait comprendre pourquoi les villes sont des acteurs majeurs dans la transition énergétique en raison des problèmes de pollution, aggravés par la congestion. La plupart ont pris des mesures drastiques pour réduire la part du diesel dès 2025. A ce titre, elles peuvent agir directement dans les transports urbains qu'ils soient publics ou opérés sous forme de régies. Il n'en demeure pas moins que les coûts d'acquisition des bus en 2020 sont très élevés (650 k€ pour un bus à hydrogène et 470 k€ pour un bus à batterie versus 210 k€ pour un bus diesel).

Enfin, les données des tableaux 1 et 2 mettent en évidence que les bus à batterie disposent d'un prix d'acquisition nettement moins élevé et d'un coût d'abattement également moins élevé que les bus à hydrogène (pour un mix électrique décarboné). Au-delà des arbitrages entre coûts monétaires, émissions de GES et émissions de polluants, certaines caractéristiques techniques des bus électriques à batterie rendent cependant les bus à hydrogène plus attractifs :

- Une autonomie de 450 km au lieu de 200 km¹³.
- Une moindre dépendance de cette autonomie que celle des bus à batterie aux conditions extérieures de température et de topographie du circuit.
- Le poids excessif des batteries pour les bus articulés.

Les contraintes engendrées par ces caractéristiques techniques identifient une part de marché sur laquelle les bus électriques à batterie ne seraient pas appropriés, et les industriels du secteur s'accordent pour considérer que les bus à hydrogène pourraient se l'attribuer. Cette part est de l'ordre de 7 % à 9 % en 2025 (Roland Berger GmbH, 2015). L'évolution des coûts associés à la filière des bus à hydrogène est donc un élément particulièrement crucial pour comprendre son potentiel de développement.

Effet de réseau et effet d'expérience dans le secteur des transports à hydrogène

Si le prix d'achat des véhicules et le prix des combustibles diminuent, les coûts d'abattement associés à la technologie concernée diminuent également, ce qui rend celle-ci attractive par comparaison avec la valeur sociale du carbone. C'est pourquoi la structure et le fonctionnement des marchés relatifs à la construction des véhicules à hydrogène (prix d'achat) et à la production de l'hydrogène (prix du combustible) sont des aspects particulièrement impor-

nologie la plus émettrice, devient préférable au bus à hydrogène avec réformage pour urbain très dense alors que c'est l'inverse pour l'urbain dense.

13. La longueur moyenne des circuits de bus parisiens est inférieure à 180 km, d'où le faible intérêt de la RATP pour cette technologie.

tants, car ils déterminent le coût d'abattement futur de cette technologie, et donc sa désirabilité environnementale et sociale. Or, le développement d'une nouvelle filière de transports, et donc a fortiori celui de la filière du transport à hydrogène, rencontre deux difficultés majeures.

La première provient d'un effet de réseau indirect, selon lequel plus il y a d'utilisateurs d'un bien primaire (véhicules), plus il y a de biens complémentaires (stations de recharge) ce qui augmente la demande du bien primaire¹⁴. Cela implique des problèmes de coordination entre acteurs industriels et peut expliquer une situation de blocage ("lock-in") : sans station de recharge pas d'usage du véhicule, mais sans véhicules pas d'intérêt pour des stations de recharge. Ainsi, la flotte de véhicules à hydrogène et le nombre de stations de recharge doivent conjointement atteindre une ampleur suffisante, sans quoi les coûts associés à faire circuler les bus à hydrogène restent élevés.

La seconde est la résultante de l'effet d'expérience, selon lequel les coûts de production d'un bien diminuent dans le temps avec les quantités produites en raison de divers mécanismes (standardisation, économie d'échelles, accumulation de connaissances, spécialisation...) ¹⁵ ; les coûts initiaux souvent élevés des véhicules décarbonés rendent particulièrement pertinente cette notion.

Ces concepts peuvent être compris comme le reflet de défaillances de marché qui peuvent justifier l'intervention des pouvoirs publics. En effet, par exemple, à l'échelle locale, les pouvoirs publics sont souvent le seul consommateur de véhicules de transport public : leur consommation de combustible à eux seuls est très importante en volume. Ceci permet de résoudre en partie le problème de coordination avec les producteurs d'hydrogène, auquel un seul interlocuteur peut fournir une demande importante. Dans le cas d'un réseau de transports publics, le fait que la carte des trajets soient également fixes, moins dense que le réseau routier dans son ensemble, et prévisible par les pouvoirs publics -c'est-à-dire par le consommateur de combustible- permet également de réduire les coûts associés à la recharge des véhicules. L'horizon temporel et la capacité financière de la puissance publique permettent également de surmonter ces effets de réseau.

Cependant, le cas des bus urbains à hydrogène présente des spécificités particulièrement adaptées à la résolution

14. Un effet de réseau se produit quand l'attractivité d'un bien dépend du nombre d'utilisateurs. On distingue les effets de réseaux directs et indirects qui opèrent via un bien complémentaire. Voir Shy (2011) pour un résumé des effets de réseau.

15. L'effet d'expérience est introduit par exemple dans la théorie de la croissance endogène pour rendre compte de divers aspects du progrès technique ; une formule simple souvent utilisée en pratique explicite le coût unitaire $C(Q)$ de la production d'un bien en fonction de la quantité cumulée Q par l'expression $C(Q) = C(1) Q^{-\beta}$ où β est le coefficient d'apprentissage ; si $\beta = 0,5$ le coût baisse d'environ 30% chaque fois que la production cumulée double ($2^{-0,5} = 0,7$) ; pour des estimations de facteurs de réduction voir par exemple International Energy Agency, 2000 et McDonald et Schratzenholzer (2001) soit 25% pour le photovoltaïque, 11% pour l'éolien.

des effets de réseau au niveau local. Les flottes de bus de transports publics au niveau local sont dites captives (c'est-à-dire que les véhicules sont opérés par un seul opérateur), ce qui permet de prévoir plus facilement les besoins en hydrogène et les stations à mettre en place. Ce ne serait pas le cas des véhicules particuliers, où l'effet de réseau est beaucoup moins facile à maîtriser que dans le cas des bus.

De plus, en ce qui concerne le prix d'achat des véhicules, l'ampleur des flottes de transports publics au niveau local ne suffit sans doute pas à faire jouer l'effet d'expérience pour réduire les coûts des véhicules. A ce stade, seules quelques agglomérations en France ont mis en service fin de 2019 les premiers bus à l'hydrogène : Pau (8), Versailles (2) et à Bruay-La-Buissière et Auchel dans le Pas-de-Calais (6). Or, la baisse des coûts nécessaire pour rendre les bus à hydrogène attractifs nécessiterait de déployer plusieurs centaines de bus par an. Un tel volume n'est envisageable qu'à l'échelle européenne.

Une politique européenne qui fait levier sur les politiques locales

Plusieurs programmes de soutien à la filière hydrogène, et plus particulièrement pour les bus à hydrogène, ont été mis en place par l'Union Européenne depuis le début des années 2000. On peut distinguer deux phases¹⁶.

La première phase était une phase de "décollage" des programmes de développement de la filière hydrogène. Six programmes ont été mis en place entre 2000 et 2017. Une douzaine de villes européennes ont bénéficié de ces programmes : typiquement il s'agissait de tester la faisabilité technique et opérationnelle d'un recours à des bus à hydrogène, avec un nombre très limité d'unités en circulation. Il s'agissait aussi de tester l'interface entre les bus et l'infrastructure en hydrogène. La question du coût ne constituait pas un obstacle à ce stade.

La deuxième phase est celle de la montée en puissance des programmes de soutien. En 2017, la Commission européenne a lancé une initiative pour des bus propres (The Clean Bus Deployment Initiative). C'est dans ce contexte favorable que deux nouveaux programmes furent lancés pour favoriser le déploiement des bus à hydrogène : JIVE 1 et JIVE 2 (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe). JIVE 1 bénéficie d'un budget total de 106 M€ et JIVE 2 de 225 M€, soit en tout un budget en hausse de plus de 50 % par rapport à la totalité des programmes

16. Ce découpage en phases successives est détaillé dans Meunier et Ponsard, 16 oct 2018. Le plan hydrogène La France va-t-elle réussir sa montée en puissance ? <https://theconversation.com/mobilite-hydrogene-la-france-va-t-elle-reussir-sa-montee-en-puissance-104125>

antérieurs¹⁷. Sous certaines conditions, les programmes JIVE 1 et JIVE 2 accordent une subvention de 200 k€ par bus acheté par une métropole ou une communauté de communes.

Le nombre de bus à hydrogène financés par ces deux programmes atteint plusieurs centaines par an. D'autres indices suggèrent que le marché des bus à hydrogène croît à l'échelle européenne ; ainsi, le 3 Juin 2019, un consortium de producteurs de bus et d'hydrogène, le Consortium H2Bus, a annoncé s'être engagé à déployer 1000 bus à hydrogène, ainsi que l'infrastructure associée, dans des villes européennes. La première phase de ce projet porte sur 600 bus à hydrogène à l'horizon 2023 (Danemark, Lettonie, Grande Bretagne) et bénéficie d'un financement de 40 M€ de l'UE¹⁸. En France, 1000 bus à hydrogène pourraient être déployés à l'horizon 2023¹⁹.

Parallèlement à cette hausse des volumes de bus achetés et projetés sur le marché européen, le prix d'achat des bus à hydrogène pourrait baisser dans un futur proche : un bus à hydrogène coûte 650 k€ en 2020, mais quelques fournisseurs semblent prêts à s'engager sur un prix inférieur à 450 k€ en 2025 sous réserve de commandes d'au moins 100 bus par an. En ce qui concerne le prix unitaire de l'hydrogène, second paramètre crucial dans le calcul du CTP des bus à hydrogène, le plan Hulot propose un certain nombre de mesures pour générer une baisse de ce prix, et retient pour projection un prix de 7 €/kg à l'horizon 2030.

Nous retenons ces deux projections pour 2025 comme hypothèses de travail pour examiner leur effet sur le coût total de possession et le coût d'abattement des bus à hydrogène. Ces projections sont résumées dans le Tableau 3, qui fait l'hypothèse d'une production de l'hydrogène par électrolyse, et d'une électricité totalement décarbonée.

Sous les hypothèses retenues dans le Tableau 3, le coût total de possession diminuerait de 5,53 €/km à 4,77 €/km de 2020 à 2025, ce qui est encore nettement supérieur à celui des bus diesel (3,96 €/km, à prix du diesel inchangé). Le coût d'abattement induit, en prenant en compte un coût social local de zone urbaine dense, passe de 1 089 €/tCO₂ en 2020 à 615 €/tCO₂ en 2025. Cette valeur est encore éloignée du prix du carbone évalué à 168 €/tCO₂ par le rapport Quinet (2019). Pour que celle-ci corresponde au coût d'abattement d'un bus à hydrogène, et en gardant inchangé tous les autres paramètres, il serait nécessaire que le prix d'achat des véhicules diminue davantage : la parité carbone en zone urbaine dense, serait atteinte en 2030 avec un prix d'achat d'un bus à hydrogène de 360 k€. Si un tel scénario est crédible il

Tableau 3 – Comparaison du coût total de possession d'un bus à hydrogène en 2020 et 2025

	2020	2025
1. Capital immobilisé	1,71	1,18
Prix d'achat correspondant (€)	650 000	450 000
2. Maintenance	0,40	0,40
3. Frais de personnel	2,63	2,63
4. Fuel	0,80	0,56
Prix unitaire (kg H ₂ , kWh, l)	10,0	7,0
Consommation au km	0,08	0,08
Total 1 + 2 + 3 + 4	5,53	4,77
Coût d'abattement		
<i>pour un coût social...</i>		
...urbain dense	1089	615
...urbain très dense	182	-621

Lecture : En 2020, le coût d'abattement d'un bus à hydrogène dont le combustible est produit par électrolyse (et sous hypothèse d'un mix décarboné, avec prise en compte d'un coût social local correspondant à un environnement urbain dense, est de 1 089 €/tCO₂.

Sources : Ce tableau s'appuie sur les données recueillies dans l'étude de référence, (Meunier, Moulin, Ponsard, 2019) sur la base de rapports spécialisés et d'entretiens auprès de professionnels.

devient justifié d'engager dès 2020 le processus de substitution²⁰ de bus diesel par des bus à hydrogène, d'où l'importance primordiale des programmes de soutien au niveau européen.

Conclusion

L'exemple des bus à hydrogène est riche d'enseignements. Il met bien en évidence l'intérêt d'une politique publique cohérente entre le niveau local pour maîtriser les effets de réseau et un niveau global suffisamment significatif pour générer les effets de volumes seuls capables d'engendrer les baisses de coûts grâce à l'effet d'expérience.

Cet exemple peut servir de référence pour évaluer les stratégies actuelles de déploiement de la filière hydrogène dans d'autres cas. Notre grille d'analyse suggère de combiner systématiquement deux niveaux dans une stratégie de déploiement de la filière hydrogène. D'une part, un niveau local dans lequel les effets de réseau sont analysés pour potentiellement réduire les coûts de coordination entre infrastructure et usage de l'hydrogène : en intégrant aussi bien les usages de transports - véhicules utilitaires, taxis, ambulances, poids lourds, camions-bennes, trains - que d'autres usages de l'hydrogène - dans les réseaux de gaz pour la production de chaleur et autres usages industriels dans les aciéries, cimenteries, complexes chimiques. D'autre part, un niveau global dans lequel les effets d'ex-

17. Pour analyse détaillée de l'efficacité de ces deux programmes voir Meunier, Moulin et Ponsard (2019).

18. <https://www.fch.europa.eu/news/fch-j-u-l-aunches-new-call-project-proposal>

19. <http://www.afhyac.org/actualites/arti cles/l e-pl an-1000-bus-hydrogene-vi ent-de-franchi r-un-nouveau-cap-en-france-1887/>

20. Ce résultat peut être obtenu de manière rigoureuse en reprenant ces calculs de coût d'abattement non pas pour la substitution d'un bus à une date donnée mais pour la substitution d'un parc de bus dans le cadre d'une trajectoire. La méthodologie correspondante a été élaborée dans Creti et al., 2018

périence sont analysés, qu'il s'agisse des coûts industriels proprement dits sur les composants de la valeur ajoutée mais aussi des coûts générés par le montage de projets locaux (montage juridique, élaboration de dossiers pour l'obtention d'aides publiques, etc).

C'est dans la bonne coordination des politiques publiques entre les niveaux local et global que se jouera la justification économique, sociale et environnementale du déploiement de la filière à hydrogène.

Auteurs

Guy Meunier est Chargé de recherche à l'INRAE (UR ALISS), Professeur chargé de cours à l'Ecole Polytechnique) et Responsable de l'axe Politiques sectorielles de la chaire Energie et Prospérité.

Jean-Pierre Ponsard est Directeur de recherche émérite au CRNS (CREST - Ecole Polytechnique) et Directeur scientifique de la chaire Energie et Prospérité.

Etudes de référence

Les arguments développés ici sont repris des deux articles suivants.

Guy Meunier, G., Lucie Moulin, L. and Ponsard, J.-P. (2019) Why local initiatives for the energy transition should coordinate - The case of cities for fuel cell buses in Europe

Guy Meunier, G. and Ponsard, J.-P. (2020) Optimal Policy and Network Effects for the Deployment of Zero Emission Vehicles, *European Economic Review*, Vol 126, <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2020.103449>

Références bibliographiques

Aber, Judah (mai 2016). « Electric Bus Analysis for New York City Transit ».

Baker, Erin, Leon Clarke et Ekundayo Shittu (2008). « Technical change and the marginal cost of abatement ». *Energy Economics* 30.6, p. 2799-2816. issn : 0140-9883.

Ballard (2019). « Fuel Cell Electric Buses-Proven Performance and the Way Forward ».

Bénita, Denis et David Fayolle (2018). « Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains ». *ADEME, AJBD*.

Creti, Anna, Alena Kotelnikova, Guy Meunier et Jean-Pierre Ponsard (2018). « Defining the Abatement Cost in Presence of Learning-by-Doing : Application to the Fuel Cell Electric Vehicle ». *Environmental & Resource Economics* 71.3, p. 777-800.

Eudy, L. et M. Post (2019). « Fuel Cell Buses in U.S Transit Fleets : current status 2018 ».

International Energy Agency (7 juil. 2000). *Experience Curves for Energy Technology Policy*. OECD. isbn : 978-92-64-17650-8 978-92-64-18216-5. doi : [10.1787/9789264182165-en](https://doi.org/10.1787/9789264182165-en).

McDonald, Alan et Leo Schrattenholzer (2001). « Learning rates for energy technologies ». *Energy Policy* 29.4, p. 255-261. issn : 0301-4215.

Nordhaus, William D. (14 fév. 2017). « Revisiting the social cost of carbon ». *Proceedings of the Nat. Ac. of Sciences of the U. S. of A.* 114.7, p. 1518-1523. issn : 0027-8424. doi : [10.1073/pnas.1609244114](https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114).

OECD (9 juin 2016). « The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution ». doi : [10.1787/9789264257474-en](https://doi.org/10.1787/9789264257474-en).

Quinet, Alain (fév. 2019). « La valeur de l'action pour le climat - Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques ». *France Stratégie*, p. 190.

Quinet, Emile (sept. 2013). « L'évaluation socio-économique des investissements publics ». *Commissariat général à la Stratégie et à la Prospective*.

Roland Berger GmbH (sept. 2015). « Fuel Cell Electric Buses - Potential for Sustainable Public Transport in Europe - A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking ».

Shy, Oz (1^{er} mar. 2011). « A Short Survey of Network Economics ». *Review of Industrial Organization* 38.2, p. 119-149. issn : 1573-7160. doi : [10.1007/s11151-011-9288-6](https://doi.org/10.1007/s11151-011-9288-6).