

L'hydrogène et la transition énergétique dans les transports

Guy Meunier, Jean-Pierre Ponssard

▶ **To cite this version:**

Guy Meunier, Jean-Pierre Ponssard. L'hydrogène et la transition énergétique dans les transports : Quelques apports de la théorie économique. Énergies " nouvelles " et société. La transition énergétique actuelle à la croisée des chemins et des savoirs, 8, MSH Paris-Saclay Éditions, pp.115-132, 2021, Actes, 978-2-490369-07-2. 10.52983/CDBJ6179 . hal-03348115

HAL Id: hal-03348115

https://polytechnique.hal.science/hal-03348115

Submitted on 3 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



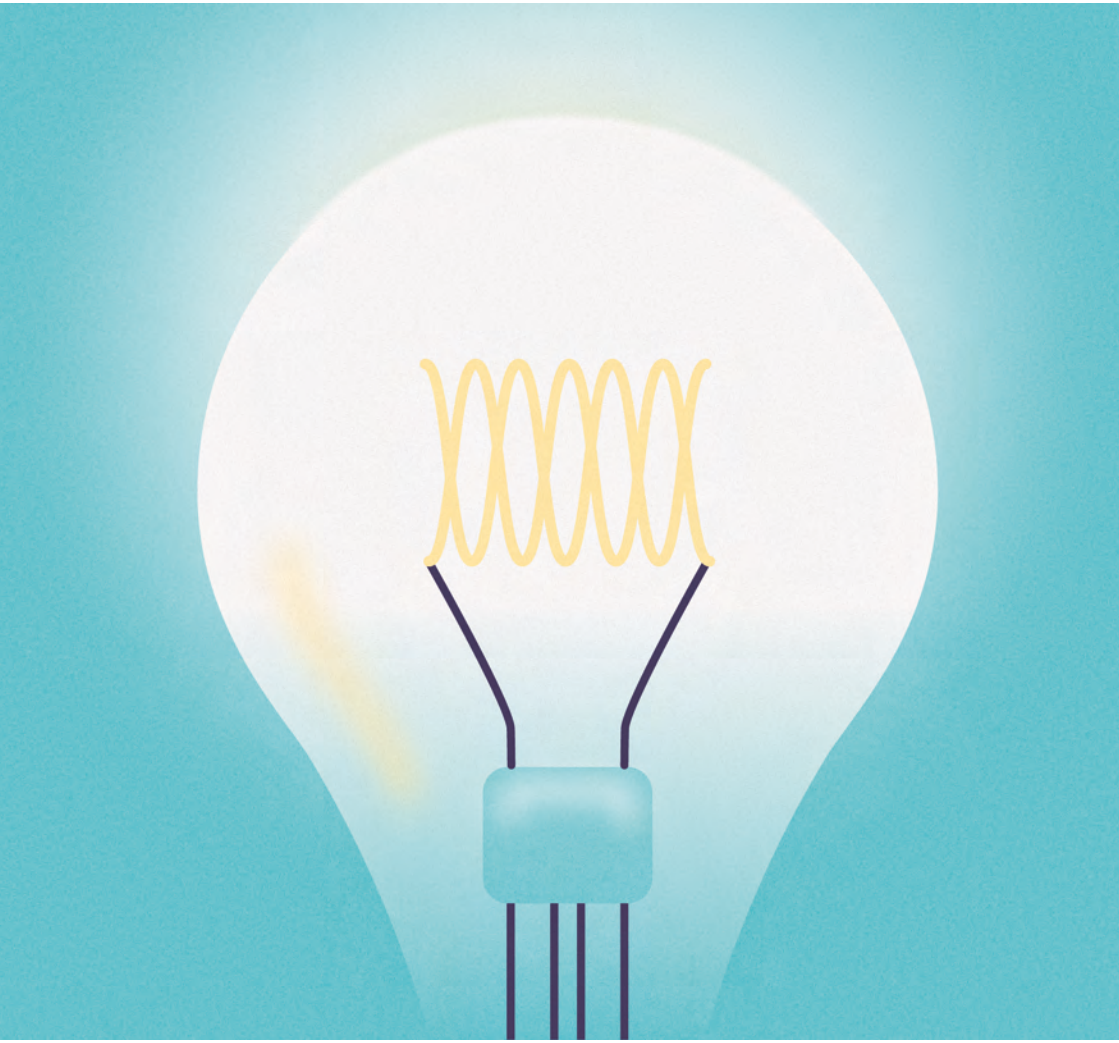
Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Maison des Sciences de l'Homme PARIS-SACLAY

ACTES

ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE À LA CROISÉE DES CHEMINS ET DES SAVOIRS



DIRECTION
Patrick Schembri & Hynd Remita

WORKSHOP MOMENTOM
21 novembre 2019
MSH Paris-Saclay

Maison des Sciences de l'Homme PARIS-SACLAY

ACTES 8

ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ

La transition énergétique actuelle à la croisée des chemins et des savoirs

WORKSHOP MOMENTOM
21 novembre 2019
MSH Paris-Saclay

DIRECTION
Patrick Schembri
Hynd Remita

MSH PARIS-SACLAY
ÉDITIONS



©MSH Paris-Saclay Éditions, 2021.

4, avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette
www.msh-paris-saclay.fr

ISBN 978-2-490369-07-2

L'hydrogène et la transition énergétique dans les transports
Quelques apports de la théorie économique

Guy Meunier & Jean-Pierre Ponssard

Résumé

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme une technologie incontournable pour relever le défi de la transition énergétique dans les transports. S'il existe déjà de nombreux projets régionaux dans lesquels cette technologie est déployée, les analyses économiques sur le sujet restent limitées. Cette note illustre comment deux concepts clés de la théorie économique, l'effet de réseau et l'effet d'expérience, peuvent contribuer à éclairer les enjeux sous-jacents dans une analyse coût bénéfice de ces projets.

Depuis le lancement du *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique* le 1er juin 2018[1] par le ministère de la Transition énergétique, les initiatives se sont multipliées, tant en France qu'à l'étranger : on peut citer les plans nationaux pour l'hydrogène, mais aussi la place accordée à ce dernier dans le plan européen, sans parler des plans au Japon, en Corée du Sud ou en Chine. Par conséquent, l'hydrogène apparaît comme une technologie incontournable pour relever le défi de la transition énergétique dans les transports. La technologie *batterie* constitue cependant une alternative crédible, si bien que les avis restent partagés. À côté de l'enthousiasme de certains, il existe aussi une interrogation légitime quant à la place réelle que pourra prendre l'hydrogène.

---

1 Cf. Ministère de la Transition écologique, 2018.

Ce texte apporte un éclairage sur cette question à partir d'une analyse économique des enjeux sous-jacents. Elle résume les présentations faites dans le cadre des Workshops MOMENTOM et reprend les principaux apports théoriques des auteurs. Ces apports seront illustrés par le cas des bus urbains à hydrogène, un segment de marché qui connaît un développement important en Europe, notamment grâce au soutien accordé par la Communauté européenne depuis le début des années 2000. Les liaisons urbaines se font en grande partie par bus (86 % en France selon l'Agence de la transition écologique [ADEME] ; cf. Bénita & Fayolle, 2018). Il y aurait environ 100 000 bus circulant dans les 75 villes les plus importantes en Europe, 68 % du parc étant constitué de bus standard de 12 m (Global Mass Transit Research, 2017). La décarbonation des liaisons urbaines par bus constitue donc un enjeu majeur, enjeu sur lequel les collectivités locales disposent d'un levier important. Cela fera l'objet de la première partie. Dans un second temps, certains apports de la théorie économique dans l'exercice d'évaluation de la solution hydrogène seront présentés.

Une étude de cas : le secteur des bus urbains

Dans le domaine du transport urbain, deux technologies permettront la décarbonation des bus : la batterie et les piles à combustible. Dans les deux cas, le moteur est électrique, alimenté soit par une batterie elle-même rechargée *via* des bornes raccordées au réseau électrique, soit par de l'électricité produite dans le véhicule *via* une pile à combustible elle-même alimentée par de l'hydrogène embarqué. Il est clair que l'efficacité est moindre en passant par l'hydrogène. Il n'en reste pas moins vrai que les bus à hydrogène disposent de certains atouts :

– une autonomie de 450 km au lieu de 200 km[2] ;
– une moindre dépendance de cette autonomie aux conditions extérieures de température et de topographie du circuit que celle des bus à batterie ;
– son poids par rapport au poids excessif des batteries pour les bus articulés.

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

Dans ces conditions, les industriels du secteur s'accordent pour considérer que les bus à hydrogène pourraient s'attribuer une part de marché située entre 7 et 9 % en 2025 (Roland Berger GmbH, 2015).

Le tableau 1 donne une estimation en €/km du Coût Total annuel de Possession (CTP) pour trois technologies pour un bus standard. Pour un bus à hydrogène (*Fuel Cell Electric Bus* [FCEB]), ce coût est de 5,53 €/km, pour un bus à batterie (*Battery Electric Bus* [BEB]) il est de 4,97 €/km, alors qu'il n'est que de 3,96 €/km pour un bus diesel (*Diesel Bus* [DB]). Il s'agit à chaque fois de la somme des coûts associés au capital immobilisé, à la maintenance, au frais de personnel et au fuel. Les différentes composantes, pour un bus roulant 40 000 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[3] (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective [CGSP], 2013) ;
– 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 fuel sont calculées en fonction d'un prix unitaire de l'énergie et de la consommation énergétique au km.

[3] À partir du prix d'achat (investissement) « P », le coût annualisé « ca » en €/an s'obtient par la formule suivante : $ca=Px(1-\delta)/(1-\delta^T)$ avec $\delta=1/(1+r)$ le facteur d'escompte et T la durée de vie de l'investissement. Avec r=4,5 %, T=12, et P=650 000, on obtient 68 213 €/an que l'on divise par 40 00 0km/an pour obtenir 1,7 €/km.

CTP 2020 (€/km)	FCEB	BEB	DB
Prix d'achat (€)	650 000	470 000	210 000
1. Capital immobilisé	*1,71*	*1,23*	*0,55*
2. Maintenance	*0,40*	*0,80*	*0,30*
3. Frais de personnel	*2,63*	*2,63*	*2,63*
Prix unitaire (kg H2, kWh, l)	10,00	0,24	1,60
Consommation au km	0,08	1,30	0,30
4. Fuel	*0,80*	*0,31*	*0,48*
Total 1+2+3+4	5,53	4,97	3,96

Tableau 1 – Comparaison du Coût Total annuel de Possession (CTP) des bus à hydrogène, à batterie ou diesel.

Source : Meunier, Moulin & Ponssard, 2020.

Ce tableau appelle un commentaire immédiat. Les nouvelles technologies ont un sérieux handicap de coût par rapport au diesel. Peut-on anticiper des baisses de leur coût et à quelles conditions ? Ce sera le point principal d'investigation que nous allons explorer. Pour répondre à cette question, il est commode d'avoir une cible : en effet, la parité avec le diesel n'est pas le bon objectif car il faut tenir compte des bénéfices sociaux associés à l'élimination du diesel ; le bon indicateur est le coût d'abattement, nous y reviendrons.

Deux autres points sont à noter en ce qui concerne plus précisément la comparaison entre FCEB et BEB, sachant que ces deux technologies sont *a priori* équivalentes en termes de bénéfice social :

– On peut quantifier ce que devrait être le nombre de km parcourus (grâce à la plus grande autonomie et à un temps de recharge plus court du FCEB) pour que les CTP soient les mêmes. En négligeant l'impact sur les frais de personnel, on trouve 46 000 km pour le FCEB contre 40 000 pour le BEB, c'est-à-dire 15 % de plus. Ce pourcentage est assez faible et montre bien que cet avantage pourra être déterminant pour certains segments de marché (on pense ici aux taxis à hydrogène utilisés par la société Hype sur Paris).
– On peut aussi s'intéresser au coût de l'hydrogène. Il faudrait que celui-ci tombe à 3 €/kg pour les CTP soient identiques. Même si le

plan français met l'accent sur la baisse des coûts de production par électrolyse, cette cible, qui devra intégrer les coûts de logistique, n'apparaît pas réaliste.

Introduisons maintenant le coût d'abattement. L'intérêt d'une substitution des bus diesel par des bus électriques à hydrogène ou à batterie dépend des coûts, mais aussi des émissions de CO_2 évitées et de la baisse de la pollution locale. La pollution locale (principalement NOx[4] et particules fines) a un impact sur la santé et il est possible de chiffrer son coût social. Le rapport Quinet (CGSP, 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 » se rajoute au coût du fuel pour les bus diesel. Le coût de 0,48 €/km va alors augmenter de 0,27 €/km pour les zones urbaines dites denses et de 1,36 €/km pour les zones très denses, ce qui est très significatif.

Pour évaluer la pertinence vis-à-vis de la réduction des émissions de CO_2 de la substitution d'une technologie émettrice (à l'image du bus diesel) par une autre moins émettrice (telle que le bus électrique), le « coût d'abattement » est couramment utilisé. Il mesure l'écart de coût ramené à la tonne de CO_2 évitée[5] (Baker, Clarke & Shittu, 2008) :

$$CA = \frac{Coût_{propre} - Coût_{fossile}}{CO_2^{fossile} - CO_2^{propre}}$$

Ce coût en €/tCO_2 peut alors être comparé avec des valeurs de références du coût social du CO_2 telles que calculées dans le rapport Quinet (France Stratégie, 2019) pour la stratégie française : 57 €/tCO_2 en 2020, 250 €/tCO_2 en 2030 et 750 €/tCO_2 en 2050[6].

---

4 Il s'agit d'oxydes d'azote.

5 Les coûts d'abattement tels que calculés en pratique peuvent soulever des difficultés en présence d'effets d'expérience (Creti *et al.*, 2018) ; nous y reviendrons.

6 Dans le rapport Quinet (France Stratégie, 2019), la trajectoire du coût social du CO_2 (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

Le tableau 2 donne le coût d'abattement, avec et sans prise en compte du coût social local. Pour le bus à hydrogène, nous faisons deux hypothèses relatives au procédé de production de l'hydrogène : par reformage du méthane ou par électrolyse[7]. Le premier procédé émet du CO_2 alors que le second n'en émet pas, à supposer que l'électricité utilisée soit décarbonée, (ceci est souvent le cas dans les écosystèmes impliqués) ; le premier procédé génère indirectement 320 gCO_2/km. Pour le bus à batterie, nous faisons également deux hypothèses : soit une électricité décarbonée (ce qui est peu probable compte tenu des durées de recharge), soit une électricité provenant du mix énergétique européen[8] ; dans ce dernier cas les émissions indirectes sont de 720 gCO_2/km. De son côté, le bus diesel émet environ 1 200 gCO_2/km.

Coût abattement €/ tCO_2	Hydrogène – reformage	Hydrogène – électrolyse	Batterie – mix européen	Batterie – mix décarboné
Sans coût social	1 789	1 312	2 113	845
Avec coût social local (urbain dense)	1 484	1 089	1 554	622
Avec coût social local (urbain très dense)	248	182	-712	-285

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

Source : Meunier, Moulin & Ponssard, 2020.

(trajectoires de) valeurs de référence telles que celles calculées par Nordhaus (2017) avec un modèle mondial de l'économie couplé à un modèle climatique.

7 Par cohérence, il faudrait alors prendre un coût d'H_2 qui est en ligne avec ce mode de production. Certains projets régionaux ont d'ailleurs adopté une approche progressive : production d'hydrogène décarbonée à partir de gaz naturel pour des usages industriels et la mobilité, en attendant la production d'hydrogène vert (cf. Athias, 2020, pour une analyse coût-bénéfice de ces programmes).

8 Comme nous l'avons vu, le mix électrique français est plutôt décarboné, mais les réseaux électriques en Europe sont interconnectés. Il faudrait mener une étude spécifique pour évaluer l'impact du développement des véhicules électriques sur les émissions de CO_2 en Europe.

La lecture du tableau 2 appelle plusieurs commentaires : (1) sans prise en compte du coût social local, les coûts d'abattement sont très élevés (de 845 à 1 789 €/tCO_2, soit en dehors de l'épure même pour la valeur tutélaire du CO_2 en 2050 selon le rapport Quinet [France Stratégie, 2019]), la différence entre les coûts totaux de possession en 2020 des bus électriques et des bus diesel ne justifient pas la substitution ; (2) la question du mode de production de l'énergie en amont est particulièrement importante pour les bus à batterie puisqu'elle peut inverser la hiérarchie avec les bus à hydrogène ; (3) la prise en compte du coût social local justifie le choix de bus à batterie mais pas de bus à hydrogène, même si on se trouve dans des zones à forte densité de population[9].

Cette première analyse fait comprendre pourquoi les villes sont des acteurs majeurs dans la transition énergétique pour des raisons de pollutions locales et de congestion. La plupart ont pris des mesures drastiques pour réduire la part du diesel dès 2025. Il n'en demeure pas moins que les coûts d'acquisition des bus en 2020 sont très élevés (650 000 € pour un bus à hydrogène et 470 000 € pour un bus à batterie *versus* 210 000 € pour un bus diesel). La justification économique de cette politique repose donc de manière cruciale sur une hypothèse implicite de baisse des coûts.

Concentrons-nous sur le FCEB. Supposons qu'on puisse tabler sur un coût d'acquisition de 450 000 € et un prix de l'hydrogène à 7 €/kg en 2025, alors le tableau 3 met en évidence que le coût d'abattement devient négatif dans les zones urbaines très denses, justifiant ainsi son déploiement en 2025.

---

[9] 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 technologie la plus émettrice, devient préférable au bus à hydrogène avec reformage pour l'urbain très dense, alors que c'est l'inverse pour l'urbain dense.

CTP FCEB (€/km)	2025	2020
Prix d'achat (€)	450 000	650 000
1. Capital immobilisé	*1,18*	*1,71*
2. Maintenance	*0,40*	*0,40*
3. Frais de personnel	*2,63*	*2,63*
Prix unitaire (kg H2, kWh, l)	7,00	10
Consommation au km	0,08	0,08
4. Fuel	*0,56*	*0,80*
Total 1+2+3+4	4,77	5,53
Coût abattement €/tCO2	**Hydrogène - électrolyse**	**Hydrogène - électrolyse**
Avec coût social local (urbain dense)	615	1 089
Avec coût social local (urbain très dense)	-621	182

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

Source : Meunier, Moulin & Ponssard, 2020.

Mais pour que le coût baisse à 450 000 € en 2025, il faut certainement produire avant cette date pour bénéficier de l'effet d'expérience, phénomène bien connu pour les nouvelles technologies, comme on l'a constaté par exemple avec le photovoltaïque. Pour que le coût de production de l'hydrogène baisse de 10 à 7 €/kg, il faut qu'il y ait une parfaite coordination entre la demande et l'offre d'hydrogène au niveau de l'infrastructure, cela compte tenu des effets d'échelle au niveau de la production et de la distribution d'hydrogène et des coûts fixes liés au fonctionnement des stations de recharge. Sur ce dernier point, l'analyse du projet EasyMob[10] en Normandie a mis en évidence que le coût de sortie à la pompe d'un kg d'hydrogène pourrait potentiellement baisser de 10 à 5,7 €/kg lorsque

[10] Le projet EasyMob, lancé en 2014, prévoyait la mise en service de 250 véhicules utilitaires Kangoo électriques avec extension hydrogène alimentés par 15 stations. Pour une analyse coût-bénéfice de ce projet, cf. Brunet &Ponssard, 2017.

la capacité des stations passe de 100 à 400 kg/jour, avec un taux de saturation de plus de 80 %. Dans le premier cas, la production d'hydrogène est centralisée avec livraison par camions. Dans le second cas, elle est décentralisée au niveau de chaque station. Bien entendu, le deuxième cas suppose une demande d'hydrogène bien plus élevée, et donc beaucoup plus de véhicules.

La théorie économique permet-elle de formaliser ces questions de manière pertinente ?

Quelques apports de la théorie économique

Pour bien comprendre les apports de la théorie économique il faut avoir en tête deux concepts importants :

– Le concept d'*effet de réseau indirect*, selon lequel plus il y a d'utilisateur·rice·s d'un bien primaire (véhicules), plus il y a de biens complémentaires (stations de recharge), ce qui augmente la demande du bien primaire[11]. Cela implique des problèmes de coordination entre les acteurs industriels et peut expliquer une situation de blocage (« *lock-in* »).
– Le concept d'*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'échelle, accumulation de connaissances, spécialisation…) ; les coûts de départ souvent élevés des véhicules décarbonés rendent particulièrement pertinente cette notion.

Ces concepts peuvent être associés à des défaillances de marché qui justifient l'intervention des pouvoirs publics. L'importance de ces concepts, ainsi que la pertinence de l'éventuelle intervention publique associée, vont varier avec les technologies (essence, batterie, H_2) et les usages (*commuting*, longue distance, taxis, livraisons…), et dans le temps au cours du déploiement d'une technologie. Leurs rôles au moment du décollage d'une technologie sont primordiaux (Meunier & Ponssard, 2020).

---

[11] Un effet de réseau se produit quand l'attractivité d'un bien dépend du nombre d'utilisateur·rice·s. On distingue les effets de réseau directs des effets de réseau indirects, ces derniers opérant *via* un bien complémentaire. Voir Shy (2011) pour un résumé des effets de réseau.

L'effet de réseau et ses implications sur l'équilibre de marché

L'effet de réseau peut être associé à ce qu'on entend dans le langage courant comme le dilemme de « la poule et l'œuf » : sans station de recharge, on n'a pas intérêt à offrir des véhicules, mais sans véhicule, on n'a pas intérêt à mettre en place des stations. Il y a donc complémentarité entre ces deux biens. La formalisation de cette interaction met en évidence plusieurs résultats :

– Si la taille potentielle du marché est faible, à l'équilibre concurrentiel, il n'y aura ni stations ni véhicules.
– Si la taille du marché est moyenne, trois équilibres sont possibles, un équilibre sans stations ni véhicules, un équilibre « inférieur » avec un nombre faible de stations et de véhicules et un équilibre « supérieur » avec un nombre élevé de stations et de véhicules ; on parle alors de *tipping point*, les protagonistes pouvant rester bloqués sur l'équilibre inférieur au lieu de mettre en place l'équilibre supérieur faute de passer le seuil du *tipping point* ; à noter que l'équilibre supérieur génère le niveau de bien-être collectif le plus élevé (cf. Figure 1).
– Si la taille du marché est élevée, alors l'équilibre inférieur rejoint l'équilibre sans stations ni véhicules, seul l'équilibre « supérieur » subsiste.

Une politique publique peut être nécessaire dans le cas d'un marché de taille moyenne. Elle s'appuie sur des subventions jointes aux stations et aux véhicules de manière à donner un coup de pouce au déploiement. Ce coup de pouce sera d'autant plus nécessaire si la taille du marché est encore faible et qu'il faudra du temps pour qu'il se développe. Le bon calibrage des subventions, d'une part entre stations et véhicules, et d'autre part dans le temps, peut être subtil. Un déséquilibre entre stations et véhicules ou la subvention d'un marché de taille durablement faible, constituent autant de sources de gaspillage des fonds publics.

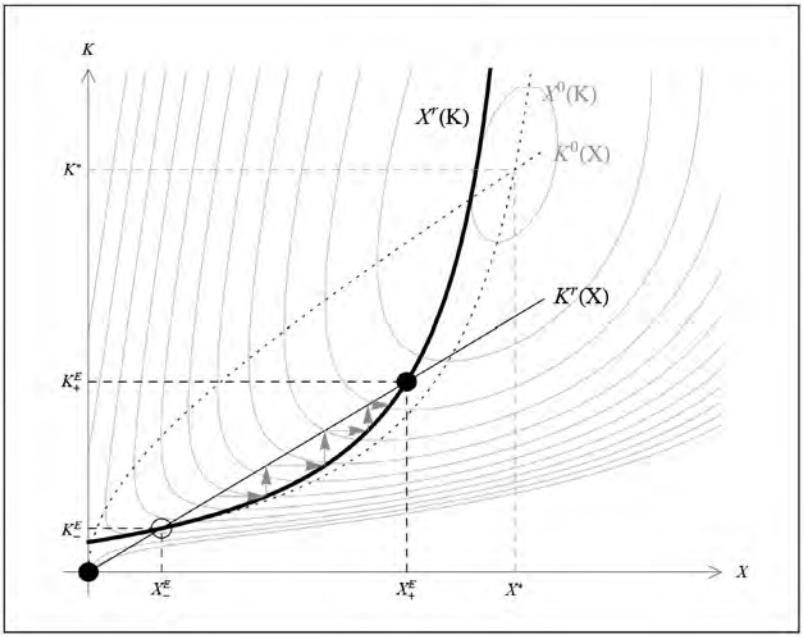


Figure 1 – Problèmes de coordination et équilibres multiples.

Source : Meunier & Ponssard, 2020.

Cette analyse théorique est à mettre en regard avec l'enjeu empirique qui consiste à s'appuyer au départ sur des flottes dites « captives » : les véhicules et les stations sont alors opérés par un même opérateur. Il est possible de prévoir les besoins en hydrogène et les stations à mettre en place. L'effet de réseau est alors beaucoup plus facile à maîtriser que dans le cas de véhicules opérés par des particuliers, et la rentabilité des stations est assurée par une montée en charge rapide, à condition bien sûr que le projet considéré l'envisage. C'est évidemment le cas des bus urbains.

L'effet d'expérience et ses implications sur le coût d'abattement

Pour bénéficier de l'effet d'expérience il faut produire, et beaucoup. Cette idée est introduite 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 β=0,5, le coût baisse d'environ 30 % chaque fois que la production cumulée double[12] ($2^{-0,5}$=0,7).

En combinant croissance du marché et effet d'expérience, il est facile de voir que si on anticipe une baisse de coût de 10 % lorsque la production cumulée double, une baisse de coût, soit de 650 à 450 000 € pour reprendre les chiffres du FCEB, serait obtenue dès 2027 avec un taux de croissance de 50 %, mais seulement en 2042 pour un taux de croissance de 6 %.

Année	2020	2027	2042
Effet d'expérience		10 %	10 %
Taux de croissance annuel		50 %	6 %
Production annuelle	185	3 161	667
Production cumulée	860	9 788	9 369
Coût unitaire	650 000	449 128	452 121

Tableau 4 – Simulation des trajectoires de coût unitaire selon le niveau d'expérience.

Source : Meunier, Moulin & Ponssard, 2020.

Il est possible d'introduire l'effet d'expérience et d'en évaluer l'impact dans le calcul du coût d'abattement. On parle alors de coût d'abattement dynamique relatif à un scénario de déploiement. Alors que le coût d'abattement statique évolue avec le temps (cf. Tableau 3), le coût d'abattement dynamique ne dépend que du scénario considéré. Par exemple, il sera beaucoup plus bas si on envisage une croissance à 50 % que dans le cas d'une croissance à 6 %, ce qui revient à dire que le premier scénario devrait être lancé bien plus tôt

[12] Pour des estimations de facteurs de réduction, cf. par exemple Agence Internationale de l'Énergie (AIE, 2000) et McDonald & Schrattenholzer (2001) : on compte 25 % pour le photovoltaïque, 11 % pour l'éolien.

que le second. Dans une analyse coût-bénéfice, le réalisme du scénario sous-jacent est alors un point majeur.

Revenons au cas des bus, il est certain que ce n'est sûrement pas au niveau de chaque métropole qu'on pourra faire jouer l'effet d'expérience pour réduire les coûts des véhicules. À ce stade, seules quelques agglomérations en France ont mis en service fin 2019 les premiers bus à hydrogène : Pau (8), Versailles (2) et Bruay-La-Buissière et Auchel dans le Pas-de-Calais (6). Pour avoir une chance d'atteindre les objectifs de baisse de coût sur la base d'un effet d'expérience, il faudrait déployer plusieurs centaines de bus par an. Un tel volume n'est envisageable qu'à l'échelle européenne. Cela nous amène à un troisième apport de la théorie économique.

Une gouvernance combinant le local et le global

Le secteur de l'hydrogène offre un exemple de situation dans lequel se superposent des initiatives locales et nationales, au sein desquelles interagissent des institutions à différents niveaux (métropoles, régions, états) et des firmes locales et multinationales. Les grandes villes constituent un lieu privilégié pour l'élaboration de politiques locales de mobilité, compte tenu de la pollution locale et de la congestion, et C40[13] est un exemple de réseau transnational volontaire. Les innovations sont non seulement techniques (bus électriques), mais aussi réglementaires, (zones à faibles émissions, péage urbain, circulation alternée…). D'autres politiques sectorielles relèvent de la même problématique. Au-delà de la mobilité, citons le secteur de la bioéconomie très innovant, qui est nécessairement ancré dans les territoires (par exemple PIVERT[14]), tout en étant au centre d'une stratégie européenne impliquant public et privé (Bio-based Industries Joint Undertaking[15]).

---

13 C40 est un réseau mondial qui associe les grandes métropoles, afin de leur permettre d'échanger sur leurs objectifs en matière de politiques climatiques et de transition énergétique.

14 Situé à l'interface de la recherche académique et du monde industriel, l'Institut pour la Transition Énergétique PIVERT a pour finalité le développement d'une filière française compétitive dans le secteur de la chimie du végétal, à partir d'une matière première renouvelable : la biomasse d'origine oléagineuse.

15 L'objectif de cette initiative, pilotée par l'UE, est de maximiser le potentiel de la bioéconomie en Europe, grâce à des technologies innovantes destinées à transformer les

L'idée est alors de combiner le local et le global en se plaçant dans une perspective dynamique. Si la formalisation d'une politique publique dans un tel cadre reste à faire, les développements précédents suggèrent qu'elle pourrait prendre la forme décrite dans le tableau 5.

Phase du déploiement	Décollage	Montée en puissance	Croisière
Caractéristiques structurelles	• Risques technologiques et commerciaux importants. • Demande privée inexistante. • Rentabilité insuffisante pour les entreprises.	• Risques commerciaux. • Une demande privée émerge à partir de projets pilotes.	Nombreuses entreprises et technologies (*Battery Electric Vehicle* [BEV], *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* [PHEV], *Fuel Cell Electric Vehicle* [FCEV]…) sur le marché, et offres de modes de transport complémentaires (véhicules à usage privé, transports collectifs, véhicules partagés…).
Politiques de soutien	• Encourager la R&D et subventionner les projets pilotes impliquant des flottes captives. • Subventionner les infrastructures dans les zones correspondantes. • Encourager à la coordination entre zones de déploiement.	• Ouverture à la concurrence dans les projets pilotes avec maintien des subventions. • Soutien actif aux infrastructures entre zones de déploiement.	• Sortir progressivement des politiques de soutien financier. • Mettre en place une régulation globale des transports pour l'usage des espaces publics et l'exploitation des données correspondantes.

Tableau 5 – Les différentes phases du déploiement de la solution hydrogène.

Source : Meunier & Ponssard, 2018.

Conclusion et perspectives

Cette analyse s'inscrit dans un programme de recherche de la chaire Énergie et Prospérité. Ce programme combine études de cas et modélisation micro-économique. Les modèles s'inspirent directement des

déchets biologiques en produits plus écologiques.

enjeux rencontrés sur le terrain et en retour fournissent des grilles permettant d'évaluer les politiques mises en œuvre.

Le plan hydrogène français fournit l'occasion d'illustrer cette démarche. Schématiquement, ce plan est concentré sur trois enjeux : la production d'hydrogène « vert » pour un usage industriel, l'utilisation de cet hydrogène dans la mobilité lourde et l'encouragement de projets territoriaux.

Les défis de l'hydrogène « vert » pour les usages industriels

Le plan français fait le choix de la production d'hydrogène « vert » par électrolyse à partir de sources d'électricité décarbonées. Une autre méthode consisterait à utiliser du méthane et à stocker le CO_2 émis lors de la transformation, ce qui donne ce que l'on appelle l'hydrogène « bleu ». Cette méthode est employée dans les régions de Rotterdam et Manchester, où se déploient d'importants projets d'hydrogène. Avec l'électrolyse, le coût est bien plus important : de l'ordre 4,5 €/kg, contre 2,5 €/kg pour l'hydrogène bleu. Un coût élevé donc, qui devrait le rester à l'avenir, et qui peut être un handicap sérieux pour les usages industriels pour lesquels le coût de l'hydrogène est un facteur critique.

Le plan prévoit la mise en place d'un « complément de rémunération » pour favoriser les usages industriels, mais les moyens à consacrer ne sont pas chiffrés. Or, la facture risque d'être très élevée. Le gouvernement est-il capable de s'engager à compenser la différence ? Et à le faire dans la durée ? Les revirements sur les mécanismes de rachat de l'électricité produite par les énergies renouvelables (ENR) invitent à la prudence quant à la capacité de l'État à prendre des engagements et à les tenir.

Les défis de l'hydrogène dans la mobilité lourde

Le deuxième volet du plan met l'accent sur l'utilisation de l'hydrogène dans la mobilité lourde (camions, bus, trains, véhicules utilitaires légers). Ce choix paraît tout à fait judicieux, c'est sur ce type de segments que l'hydrogène a des atouts par rapport à la batterie. Notre grille d'analyse est ici particulièrement pertinente.

À l'exception du cas très particulier des taxis parisiens mis en œuvre par la société Hype, les différents programmes régionaux développés

en France souffrent structurellement de manque de coordination entre la mise en place de l'infrastructure et les utilisateur·rice·s potentiel·le·s. L'encouragement à la mutualisation des usages est particulièrement bienvenu, mais il est complexe à mettre en œuvre tant les métiers peuvent être différents. L'argent n'est pas forcément la clé de voûte.

Relever le défi de la baisse des coûts nécessite une approche européenne. Ceci appelle une remarque. Si la France dispose d'acteurs majeurs sur certains composants critiques (piles à combustibles, réservoirs haute pression), les constructeurs automobiles français tardent à investir sur l'hydrogène, tout comme les constructeurs allemands d'ailleurs. Ils s'engagent prioritairement sur les véhicules électriques à batterie. Comment créer des incitations pour qu'ils investissent sur une autre technologie, sachant qu'ils doivent faire face en plus à une situation de crise ?

Faire des industriels français des champions au niveau mondial ?

Le pari de l'hydrogène effectué par la France répond sans nul doute à l'enjeu climatique. Il y a aussi derrière ce pari le désir et l'espoir de faire des industriels français des champions mondiaux en la matière. Certains industriels français sont bien placés au niveau international, mais la concurrence sera rude face à des entreprises telles que Balard, Hyundai, Toyota, BYD, pour n'en nommer que quelques-unes. De surcroît, la France n'est pas la seule à développer une politique industrielle. Il y a bien sûr l'Allemagne mais aussi, et surtout, le Japon, la Chine et la Corée du Sud. Que ce soit pour structurer la filière française dans cette féroce compétition internationale, ou pour relever tous les défis que nous avons évoqués précédemment, le haut-commissariat au Plan devra s'emparer du sujet.

Références bibliographiques

Agence Internationale de l'énergie (AIE), 2000. *Experience Curves for Energy Technology Policy.* Paris, Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE)/AIE.

Athias Clément, 2020. « Déploiement de l'hydrogène dans les zones industrialo-portuaires », Rapport de stage [En ligne], ENS Lyon / Chaire Énergie et Prospérité. Mis en ligne le 23/04/2020 (consulté le 03/05/2021). URL :

http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/doctoral-master-thesis-publications/deploiement-de-lhydrogene-zones-industrialo-portuaires/

Baker Erine, Clarke Leon & Shittu Ekundayo, 2008. « Technical Change and the Marginal Cost of Abatement », *Energy Economics* [En ligne], 30 (6), p. 2799-2816. Mis en ligne le 18/01/2008 (consulté le 15/04/2021). DOI : 10.1016/j.eneco.2008.01.004

Bénita Denis & Fayolle David, 2018. *Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains. États des lieux sur les technologies et les filières énergétiques existantes et en devenir pour le transport par autobus*, Rapport [En ligne], ADEME/AJBD (Expertises). Mis en ligne en 03/2019 (consulté le 15/04/2021). URL : https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains

Brunet Julien & Ponssard Jean-Pierre, 2017. « Policies and Deployment for Fuel Cell Electric Vehicles an Assessment of the Normandy Project », *International Journal of Hydrogen Energy* [En ligne], 42 (7), p. 4276-428. Mis en ligne le 24/12/2016 (consulté le 23/04/2021). DOI : 10.1016/j.ijhydene.2016.11.202

Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective (CGSP), 2013. *L'Évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapport de la mission présidée par Émile Quinet, Tome 1 [En ligne]. Mis en ligne le 18/09/2013 (consulté le 15/04/2021). URL : https://www.strategie.gouv.fr/publications/levaluation-socioeconomique-investissements-publics-tome1

Creti Anna, Kotelnikova Alena, Meunier Guy & Ponssard Jean-Pierre, 2018. « Defining the Abatement Cost in Presence of Learning-by-Doing: Application to the Fuel Cell Electric Vehicle », *Environmental and Resource Economics*, 71, p. 777-800. Mis en ligne le 11/09/2017 (consulté le 15/04/2021). DOI : 10.1007/s10640-017-0183-y

France Stratégie, 2019. *La Valeur de l'action pour le climat Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, Rapport de la commission présidée par Alain Quinet [En ligne]. Mis en ligne le 18/02/2019 (consulté le 15/04/2021). URL : https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat

Global Mass Transit Research, 2017. *European Urban Bus Market Outlook Report 2017-2030*, Rapport [En ligne]. Mis en ligne en 10/2017 (consulté le 15/04/2021). URL : https://www.globalmasstransit.net/report/Europe-Bus-Report-market-outlook-Part-1-2017.pdf

McDonald Alan & Schrattenholzer Leo, 2001. « Learning Rates for Energy Technologies ». *Energy Policy* [En ligne], 29 (4), p. 255-261. Mis en ligne le 08/01/2001 (consulté le 15/04/2021). DOI : 10.1016/S0301-4215(00)00122-1

Ministère de la Transition écologique, 2018. *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*, Les Mesures [En ligne]. Mises en ligne le 01/06/2018 (consultées le 15/04/2021). URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf

Meunier Guy & Ponssard Jean-Pierre, 2018. « Quelle politique pour encourager le déploiement des véhicules à hydrogène en France ? », *Policy Paper* [En ligne], Chaire Énergie et Prospérité. Mis en ligne le 10/09/2018 (consulté le 23/04/2021). URL : http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/politique-encourager-deploiement-vehicules-a-hydrogene-france/

—, 2020. « Optimal Policy and Network Effects for the Deployment of Zero Emission Vehicles », *European Economic Review* [En ligne], 126, 103449. Mis en ligne le 04/05/2020 (consulté le 15/04/2021). DOI : 10.1016/j.euroecorev.2020.103449

Meunier Guy, Moulin Lucie & Ponssard Jean-Pierre, 2020. « Why Local Initiatives for the Energy Transition Should Coordinate The Case of Cities for Fuel Cell Buses in Europe », *Working Paper* [En ligne], Chaire Énergie et Prospérité. Mis en ligne le 16/04/2020 (consulté le 23/04/2021). URL : http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/why-local-initiatives-for-the-energy-transition-should-coordinate-the-case-of-cities-for-fuel-cell-buses-in-europe/

Nordhaus William D., 2017. « Revisiting the Social Cost of Carbon », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [En ligne], 114 (7), p. 1518-1523. Mis en ligne le 31/01/2021 (consulté le 15/04/2021). DOI : 10.1073/pnas.1609244114

Roland Berger GmbH, 2015. *Fuel Cell Electric Buses: Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the* Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), Étude [En ligne]. Mise en ligne en 09/2015 (consultée le 15/04/2021). URL : https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF

Shy Oz, 2011. « A Short Survey of Network Economics », Review of Industrial Organization [En ligne], 38 (2), p. 119-149. Consulté le 15/04/2021. URL : https://www.jstor.org/stable/23884968

ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE À LA CROISÉE DES CHEMINS ET DES SAVOIRS

Les mutations importantes imposées par l'urgence climatique, la digitalisation accélérée des activités économiques et la crise sanitaire interrogent la manière dont on comprend le monde et ses évolutions. À ce titre, l'énergie demeure au centre des débats sur l'avenir des sociétés. Les deux derniers siècles ont été marqués par des progrès considérables, qui ont reposé sur un usage intensif des ressources énergétiques à l'origine de problèmes d'ordres écologique et technologique. Les réponses actuelles proposées reposent à la fois sur la pleine maîtrise de la consommation d'énergie et la forte pénétration des sources renouvelables dans les mélanges énergétiques utilisés. Or, ces réponses sont sources de défis pour les acteurs des filières énergétiques, les usagers et les décideurs politiques. En effet, la transition énergétique actuelle doit promouvoir la sobriété énergétique requise pour préserver la stabilité du climat, tout en garantissant le droit d'accès à une énergie bon marché.

Comment pareille transition rencontre-t-elle le droit par référence à la protection des libertés individuelles et à la garantie de la sécurité de chacun ? Sous quelles conditions les innovations technologiques, telles que la solution hydrogène pour la mobilité et la batterie pour le stockage de l'énergie électrique, peuvent-elles être déployées à grande échelle ? Quels sont les obstacles à l'appropriation par les usagers des technologies contribuant à la maîtrise de leur consommation d'énergie ? Telles sont les questions traitées dans cet ouvrage qui rassemble des contributions présentées lors du workshop MOMENTOM *(MOlecules and Materials for the ENergy of TOMorrow)* du 21 novembre 2019 à la Maison des Sciences de l'Homme Paris-Saclay. S'inscrivant dans le cadre de l'Initiative de Recherche Stratégique du même nom, l'approche originale adoptée dans ces pages vise à croiser les regards de chimistes, économistes et juristes sur les modèles de référence et autres systèmes de représentation de la transition énergétique actuelle.

ISBN 978-2-490369-07-2
EAN 9782490369072