

MIG ALEF - Nouvelles mobilités électriques : véhicules à batterie et à hydrogène

Groupe 1 : David Breteau, Paul Cazali, Rapahël Faurie,
Antoine Rousseau, Quentin Toulemonde

Groupe 2 : Louis Beauval, Jérémy Perdrizet, Jean Delaplace

Groupe 3 : Jia Fu, Pierre Allain, Arthur Hochedez, Gaspard Brue

Groupe 4 : Diane Scher, Maxendre Buvot, Floren Llaser

7 janvier 2021

Table des matières

Synthèse	3
I - Outil de calcul de coût et impact environnemental d'un véhicule	5
1 Introduction	5
2 Méthodologie	5
2.1 Principales composantes du coût de possession d'un véhicule	5
2.2 Principaux impacts environnementaux des différents types de véhicule	6
2.3 Usages et consommations	7
2.4 Dimensionnement	8
3 Résultats	9
4 Discussions	10
II - Optimisation de la production énergétique	11
5 Introduction	11
6 Méthodologie	11
7 Modélisations	11
7.1 Modèle 1 : électrolyseurs	11
7.2 Modèle 2 : piles à combustible	12
7.3 Modèle 3 : proportion voitures propres	12
III - Coût du renforcement des infrastructures de recharge des véhicules à batterie	14
8 Introduction	14
9 Estimation de la demande de recharge des véhicules électriques	14
10 Stratégies de chargement	14
10.1 Première modélisation : Gaussienne sur 20h	14
10.2 Seconde modélisation : Bimodale centrée sur 8h et 20h	14
10.3 Troisième modélisation : Pilotage de la demande	15

11 Programme Python	15
12 Programme Matlab	15
13 Coût	15
14 Résultats et interprétation	16
14.1 Résultats	16
14.2 Intepretation	16
15 Conclusion	17
IV - Evaluation du prix du kilogramme de H₂ à la pompe	18
16 Introduction	18
17 Modélisation	18
17.1 Analyse de la demande	18
17.2 Analyse des besoins en équipements	18
17.3 Demande énergétique de certains composants	19
17.4 Analyse économique	19
17.5 Lieu de production de H ₂	19
18 Résultats et analyses	20
18.1 Prix global	20
18.2 Pertinence de l'éolienne	22
19 Conclusion	22
Bibliographie	23
Annexe	26

Synthèse

Introduction générale

Depuis quelques années, l'offre de véhicules électriques à batterie s'élargit. En effet, les réglementations de l'Union Européenne en termes d'émissions de gaz à effet de serre et le plan de soutien à la filière automobile française vont dans le sens d'une électrification de la flotte de véhicules particuliers.

Les véhicules électriques ou à hydrogène sont de plus en plus présents sur nos routes, notamment pour la mobilité lourde et les véhicules utilitaires. Pour les véhicules particuliers, seulement deux modèles sont aujourd'hui commercialisés en France (Toyota Mirai et Hyundai Nexa), mais le prix élevé et l'infrastructure de recharge quasiment inexistante restent des obstacles à un développement du parc de véhicules à hydrogène.

Est-ce que l'hydrogène peut être une alternative sérieuse dans le monde des transports ? Quelles sont les implications d'une forte pénétration des véhicules électriques sur le système énergétique ?

Durant cette étude nous nous sommes intéressés à l'impact économique du renforcement du réseau électrique avec plusieurs scénarios sur la part de véhicules électriques dans le parc automobile français, au coût d'achat d'un véhicule à hydrogène et au coût de l'hydrogène à la pompe. Nous avons également calculé les coûts de production d'énergie électrique avec différentes technologies (nucléaire, éolien, solaire, etc). Enfin nous avons déterminé l'empreinte environnementale de la construction et de l'utilisation de véhicules électriques.

Coût de la recharge des véhicules à batterie

Nous avons évalué le coût réel de l'infrastructure de recharge pour véhicules à batterie. Il s'agissait notamment d'estimer le coût de renforcement du réseau à prévoir. Nous avons considéré différents cas d'usages (urbain et rural) et différents taux de pénétration (de 25% à 75%). Il existe deux principaux facteurs limitant la recharge des véhicules électriques : le pic de consommation des ménages et, pour un taux de pénétration élevé, le pic de consommation des véhicules électriques.

Nous avons construit plusieurs modèles de distribution de la recharge. Tout d'abord une gaussienne centrée en 20h, puis une gaussienne avec pilotage de la recharge qui enclenche un retard de 4h pour éviter le pic de consommation de 20h. Et enfin une distribution bimodale de la demande (à 9h pour les usagers qui chargent en arrivant au travail et 20h pour le retour au domicile).

À partir des caractéristiques des grilles de distribution du réseau, nous avons calculé le surcoût dû au renforcement du réseau pour tous les scénarios.

Nous avons montré qu'un renforcement du réseau est nécessaire pour les taux de pénétration élevés mais que le coût de mise à niveau ramené au nombre d'habitants est inférieur à la centaine d'euros dans le pire des cas. D'autant plus que le pilotage de la demande permet de diminuer d'un facteur 3 le prix de mise à niveau du réseau.

Coût de l'hydrogène à la pompe

Nous avons calculé le prix à la pompe de l'hydrogène dans plusieurs cas. Tout d'abord, nous avons considéré le cas où l'hydrogène est acheté dans une usine de production puis acheminé jusqu'à la station. Nous avons ensuite considéré le cas où l'hydrogène est produit sur place par électrolyse, avec l'ajout d'une éolienne dans un troisième cas.

La modélisation des coûts de fonctionnement et d'investissement de la chaîne de production sur place ou d'importation du dihydrogène semblent nous indiquer deux régimes de fonctionnement : - Pour les petites stations, une production sur place du H_2 avec des prix plus intéressants que pour l'importation qui varient entre 10€ et 6.90€ au kilo, valable pour une demande quotidienne en H_2 inférieure à 381 kg. - Pour les stations plus conséquentes, une production extérieure à la station avec importation, ce qui donne un prix de base de 7.30€/kg et qui diminue avec la demande quotidienne, passant en-dessous de la valeur-but de 6.50€/kg dès que la demande quotidienne dépasse 480 kg H_2 .

Il convient néanmoins de garder en tête le fait que le prix du H_2 à la pompe, dans le cas de l'importation de ce dernier, a été calculé en se basant sur le prix actuel de l'hydrogène, c'est-à-dire celui fait avec un bilan carbone globalement mauvais. En ajoutant à ça les émissions des camions qui effectuent le transport du H_2 jusqu'à la station, on s'éloigne de façon conséquente de la motivation initiale du sujet : réduire les émissions de gaz à effet de serre. Toutes choses considérées, et malgré une perte de compétitivité vis-à-vis des énergies fossiles, il paraît donc souhaitable que toute station hydrogène fonctionne avec une production sur place, même si cela signifie avoir un prix variable entre 10€ et 6.81€ le kilo de H_2 .

A ce prix, il faut ajouter environ 0.5€ par kg d' H_2 pour obtenir le prix de l'hydrogène pour le consommateur, ce qui permet à l'entreprise de rembourser ses investissements et d'obtenir un bénéfice.

Impact de l'électrification sur la demande énergétique d'un territoire

Nous avons aussi pour objectif de calculer et d'optimiser les coûts relatifs à l'installation d'une flotte de véhicules propres.

Pour ce faire, nous avons pris en main un programme d'optimisation du coût de l'électricité utilisant les données de consommation électrique en France et des coûts des moyens de production d'électricité. Nous y avons ajouté la production d'hydrogène et sa réutilisation pour produire de l'électricité, et enfin nous avons pris en considération les demandes des voitures électriques et à hydrogène ainsi que les coûts de stockage et de transport. Ce faisant, nous avons déduit à partir de certaines simulations un coût linéaire de production d'hydrogène (environ 30M euros/TWH) et un coût d'installation de la flotte propre de 27 MDs euros par ans après annualisation des couts.

Outil de calcul de coût et impact environnemental des véhicules électriques

Afin de réduire l'empreinte carbone du transport, la stratégie principale est l'électrification du secteur. Actuellement, les prix à l'achat d'un véhicule électrique peuvent néanmoins être rebutants. L'étude Véhicule avait pour objectif de déterminer approximativement les impacts réels des véhicules électriques, et de les comparer aux autres véhicules : thermiques, hybrides et à hydrogène. Ensuite, il sera plus aisé d'orienter à une prise de décision.

Indéniablement, lorsqu'un véhicule est propulsé par un moteur électrique, il n'y a pas d'émissions directes. Mais les véhicules électriques sont loin d'être "verts".

D'une part, il faut produire l'énergie électrique qu'utilise le moteur électrique pour les véhicules qui se rechargent. C'est pourquoi il faut donc considérer le mix électrique en vigueur. En France, notre électricité est assez décarbonée. A titre d'exemple, faire rouler une voiture électrique émet dix fois moins que pour une voiture essence pour deux fois moins cher. Cependant, avec un mix chinois (charbon), les voitures électriques émettent autant que les voitures essences !

D'autre part, les composants pour stocker la source d'électricité nécessitent beaucoup plus de matériaux que pour les ICEV. Les batteries (Cobalt, Nickel, Lithium, Manganèse) ou pile à combustible (Platine) et réservoir d'hydrogènes (Fibre de carbones), augmentent de façon non négligeable l'empreinte carbone. Bien évidemment, nous avons considéré des profils de conduites et des tailles de véhicules variés : globalement, les émissions des véhicules électriques sont supérieures à la moitié des émissions thermiques.

D'un point de vue économique, l'ensemble des primes et bonus écologiques, les coûts d'entretien plus faibles pour les motorisations électriques et le cout deux fois plus faible de l'électricité par rapport à l'essence en équivalent €/km démontrent que le TCO d'un véhicule électrique est le plus faible de tous les véhicules. On notera que les FCEV restent les plus chers du fait de la faible maturité sur le marché de ce genre.

Dans nos simulations, en faisant fi de ces problèmes, les véhicules hybrides apparaissent comme un intermédiaire à la fois économique et écologique entre électrique pur et ICEV.

Conclusion

Les transports sont responsables de 29% des émissions de gaz à effet de serre en France et sont donc au centre de la problématique climatique actuelle. Cette étude a donc eu comme objectif d'évaluer toutes les technologies de transport existantes.

Les véhicules électriques, grâce aux aides et à la taxe carbone apparaissent moins cher (27€/100km) que les véhicules thermiques (34€/100km), mais les véhicules hydrogène le sont beaucoup plus (44€/100km).

Le passage au véhicule électrique va nécessiter une augmentation de la production électrique (multiplication du coût du mix électrique par trois, à nuancer cependant avec la diminution des consommations d'énergies fossiles). Ce passage nécessite aussi un renforcement du réseau, car les demandes seront majoritairement concentrées sur certaines plages horaires. L'idée du pilotage est donc intéressante pour s'adapter à la production du solaire et de l'éolien et pour lisser la sur-demande.

L'étude du cas du véhicule à hydrogène montre que la production de l'hydrogène doit être réalisée au sein même des stations hydrogènes pour un coup variant entre 10€ et 6.81€ le kg de H_2 . On perd ainsi en compétitivité par rapport aux énergies fossiles, mais la compétitivité s'améliore avec l'augmentation de la demande.

I - Outil de calcul de coût et impact environnemental d'un véhicule

1 Introduction

Responsable de 29% des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France (Focus sur les mesures pour le déploiement des véhicules moins polluants, s. d.), le secteur routier représente un véritable enjeu dans la transition écologique au cours des prochaines décennies. Dans une optique de réduction des rejets et de décarbonation du parc automobile, la stratégie gouvernementale actuelle consiste à progressivement diminuer la proportion des véhicules à essence pour atteindre les objectifs fixés comme l'arrêt de la vente des véhicules particuliers utilisant des énergies fossiles d'ici 2040.

La promotion des véhicules électriques et à hydrogène au public sera donc primordiale pour justifier et aider le choix des futures voitures. Pour le consommateur, il est nécessaire de comparer les coûts de possession des différentes voitures proposées, c'est-à-dire évaluer le TCO (*total cost of ownership*) du véhicule. Enfin, avec cette donnée et des campagnes d'information, la transition sera rendue possible.

Pour ce faire, il convient d'identifier et quantifier les principales composantes du coût de possession d'un véhicule, discuter de la modifiabilité de ceux-ci compte tenu du client. En raison des différents usages, rural, urbain ou périurbain, le cycle de conduite varie : il convient de réaliser différents profils de vitesse. En s'appuyant sur des modèles de batterie ou de piles à combustible comme pour le véhicule hybride (Chauvin et al., 2015), il est déjà possible de réduire ce TCO. Le dimensionnement et l'architecture doivent être adaptés à l'utilisation du véhicule. Les considérations faites s'appliquent à la France.

Finalement, afin de valider la viabilité écologique d'un marché massif de véhicules électriques, l'impact environnemental devra être évalué. Pour ce faire, nous identifierons et quantifierons les principaux impacts environnementaux des différents types de véhicule en termes d'émissions de GES et d'usage de matériaux.

2 Méthodologie

2.1 Principales composantes du coût de possession d'un véhicule

2.1.1 Paramètres généraux du TCO

Le TCO prend en compte les dépenses liées à un bien tout au long de sa vie, et même celles après son utilisation.

D'abord, dans le cadre d'un véhicule, on prend en compte le prix d'achat du véhicule. Celui-ci dépend

de sa taille, du type d'énergie utilisée, de la marque, de la technologie abritée, etc.

Ensuite, il faut considérer les prime et les bonus et malus liés à l'achat : prime à la conversion, bonus écologique, aides gouvernementales, impôts sur les émissions, etc.

Enfin, le véhicule a un coût d'utilisation. Celui-ci regroupe l'entretien mais aussi le prix du carburant. La gestion de fin de vie n'a pas été prise en compte dans cette étude.

2.1.2 Détails du prix à l'achat

Le prix d'achat d'un véhicule est une somme de coûts de parties du véhicule.

On peut d'abord considérer l'*Energy Storage System* (ESS). Il peut s'agir d'une batterie (voitures électriques et hybrides), un réservoir (voitures thermiques ou hybrides) dont le prix est compté dans celui du *Driving Train* (DT) ou un ensemble "réservoir + pile à combustible" (voitures à hydrogènes). D'après Benital et al (Benitez et al., 2021) et le rapport de l'IEA 2019 (The Future of Hydrogen – Analysis, s. d.), un pack batterie peut représenter 45% du prix d'achat et coûter 157€/kWh, et le prix des piles à combustible se situe aux alentours de 160€/kW et 880€/kgH_{2stocké}. Les prévisions pour l'année 2050 seraient une baisse des prix à 60€/kW et 450€/kgH_{2stocké} (Cox et al., 2020).

Le DT peut être, dans les véhicules que l'on considère, un moteur électrique (12€/kW) ou un moteur thermique appelé ICE (25€/kW) (d'après (The Future of Hydrogen – Analysis, s. d.)). Dans le DT est aussi prise en compte la boîte de vitesse, propre aux voitures thermiques. D'autres composants comme le châssis, la carrosserie, la technologie embarquée sont à prendre en compte et ceux-ci sont communs à toutes les motorisations.

2.1.3 Bonus, malus et primes

Pour la première conversion de thermique à électrique (que ce soit hybride ou 100% électrique), la prime à la conversion s'élève à 2 000€ (Bonus et malus écologiques en 2020, s. d.).

Sous certaines conditions, l'acheteur peut obtenir un bonus écologique à l'achat dont les montants sont répertoriés dans la Table 4 (Annexe).

Le montant des malus CO₂ est relié aux émissions que produit le véhicule en roulant. Il est graduel en fonction des émissions (Table 5 Annexe).

Il existe aussi une taxe CO₂ visant les acheteurs de véhicules d'occasion, dépendant de la puissance fiscale (Table 6 Annexe).

Enfin, il existe un malus annuel pour les voitures les plus polluantes (émissions > 190 gCO₂/km) à hauteur de 160€/an (Bonus et malus écologiques en 2020, s. d.).

2.1.4 Coûts d'utilisation

On peut séparer les coûts d'utilisation en trois catégories : les coûts liés au carburant, les coûts d'entretien et les assurances.

Les carburants considérés sont l'essence (1.35€/L), le diesel (1.26€/L), l'électricité et l'hydrogène dont les prix sont 10€/kg_{H₂} (constante d'après Evaluation du prix du kg de H₂ à la pompe) pour l'H₂ et un prix variable pour l'électricité : 0.14€/kWh chez soi (Grille prix Tarif Bleu, s. d.), 0.25€/kWh en urbain (Quel est le prix de la recharge pour une voiture électrique?, 2019), 0.38€/kWh en moyenne pour l'autoroute (Cf Complément 1.1 Annexe).

Au cours de sa vie, un véhicule a besoin d'être plus ou moins entretenu selon la nature du véhicule. Les entretiens les plus récurrents sont la vidange de la boîte de vitesse, la vérification ou le remplacement de la courroie, des filtres, des freins, de la climatisation, de la batterie, des pneus, des amortisseurs et le contrôle technique. D'après l'AVERE (L2C2, s. d.), le prix d'entretien des voitures électriques est 30% inférieur à celui des voitures thermiques. Nous avons considéré un prix identique à l'électrique pour les véhicules à hydrogène, et un prix réduit de 10% (choix personnel) pour les hybrides par rapport aux voitures thermiques (Cf Complément 1.2 Annexe). Les prix estimés sont répertoriés dans la Table 7 (Annexe) en €/an.

Même si la batterie s'use (Masih-Tehrani et al., 2013) (Cf Complément 1.3 Annexe), on considérera qu'elle garde les mêmes caractéristiques tout au long de sa vie (150 000km).

Enfin, l'achat d'un véhicule s'accompagne de la prise d'une assurance, qu'il faut souscrire chaque année.

2.2 Principaux impacts environnementaux des différents types de véhicule

Les impacts environnementaux interviennent à différents moments du cycle de vie d'un véhicule :

- à la fabrication.
- à l'utilisation.
- à la fin de vie (non traitée).

Pour chaque type de véhicule, on peut identifier un impact environnemental à la production de pièces communes : châssis, portes, sièges, ... et un impact associé aux pièces spécifiques aux différents modèles : ICE, batterie, modules électriques, ...

2.2.1 Véhicules à batteries

Certes il n'y a pas d'émissions de GES sur la route, mais la production de l'électricité utilisée a son impact carbone. Quant à la fabrication des batteries, elle nécessite quantité de métaux rares et beaucoup d'énergie, elle-même carbonée.

Coût environnemental de fabrication

La construction de la batterie représente en France 60 à 70 kgCO₂/kWh (Kurland, 2019), et ce nombre augmente si la source d'énergie pour produire est plus carbonée. En ordre de grandeur, nous avons estimé qu'il faut dépenser 1000 kWh_{el} pour produire 1 kWh de batterie. Ainsi, l'émission pour produire une batterie est :

$$GES_{\text{Bat}} = C_{\text{Bat}} \times 1000 \times FE_{\text{el}} \quad (1)$$

où FE_{el} en kgCO₂/kWh_{el} est le facteur d'émission du mix électrique, et C_{Bat} la capacité de la batterie utilisée.

On peut aussi s'intéresser à la quantité de matériaux utilisés pour faire une batterie. Aujourd'hui, selon une présentation du CEA (2019) (CEA, 2019), la catégorie de batterie NMC représente 80% des batteries utilisées dans le secteur automobile, c'est pourquoi on se limite à leurs données, présentées dans la Table 8 (Annexe).

Coût environnemental d'utilisation

Il est lié au mix électrique, plus ou moins carboné, à partir duquel la voiture tire son énergie lors de la phase de charge. En France, le facteur d'émission du mix est FE_{el} = 0.080kgCO₂/kWh_{el} (Les émissions de CO₂ par kWh produit en France, s. d.).

2.2.2 Véhicules à pile à combustible

Sauf mention contraire, toutes les données citées ci-dessous sont extraites de (Benitez et al., 2021).

Coût environnemental de fabrication

Le facteur d'émission de la pile à combustible est FE_{PC} = 0.9 kgCO_{2eq}/100km. Il ne dépend pas de la puissance de la pile car augmenter la puissance revient seulement à ajouter des stacks, et la variation reste faible relativement à l'impact des réservoirs. En effet, les réservoirs sont faits en fibre de carbone, et produire 1 kg de fibre émet 35 kg de CO_{2eq}. Pour chaque kg de H₂ stockable, l'impact carbone revient donc à 0.62 kgCO_{2eq}/100km. En notant C_{H₂} la capacité en kgH₂ des réservoirs, l'émission de GES à la production des réservoirs est donc :

$$FE_{\text{Res}} = 0.62 \times C_{\text{H}_2} \quad (2)$$

Concernant les matériaux, le platine est le seul matériau qui importe. Il y en a 0.24g/kW de Pile, et l'industrie vise deux fois moins. Soulignons tout de

même qu'aujourd'hui il est possible d'en recycler 95%.

Coût environnemental d'utilisation

Comme pour les batteries, l'impact environnemental d'une pile est lié à la production de l'hydrogène utilisé. Le facteur d'émission de l'hydrogène est, en $\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ (Cf Complément 2.1 Annexe) (David et al., 2019) :

$$FE_{\text{H}_2} = 55 \times FE_{\text{el}} \quad (3)$$

2.2.3 Données finales

Coût environnemental de fabrication

On part de données de base (Cox et al., 2020) et on ajoute les éléments manquants.

ICEV	12.1
HEV	$10.9 + \text{GES}_{\text{Bat}}/1500$
PHEV	$12.1 + \text{GES}_{\text{Bat}}/1500$
BEV	$7.8 + \text{GES}_{\text{Bat}}/1500$
FCEV	$9.1 + 0.9 + FE_{\text{Res}} + \text{GES}_{\text{Bat}}/1500$

Coûts environnementaux de fabrication en $\text{kgCO}_2/100\text{km}$, pour une autonomie totale de 150 000 km.

Coût environnemental d'utilisation

Il suffit de prendre la consommation du véhicule (en kWh pour les électriques, en litres d'essences pour les ICEV et HEV, en kg d'H_2 pour les FCEV, et séparer pour PHEV électrique et essence) sur 100 km et de multiplier par l'impact d'utilisation en $\text{kgCO}_2/\text{Unit}$ (résultats en $\text{kgCO}_2/100\text{km}$). Pour les machines thermiques, nous avons considéré uniquement le cas de l'essence, avec une émission de $2.3 \text{ kgCO}_2/\text{L}$.

2.3 Usages et consommations

Le type de véhicule conseillé dépend fortement de l'utilisation faite. Ainsi, un particulier qui utilise souvent le système autoroutier se dirigera vers un véhicule avec une plus forte batterie qu'un autre circulant uniquement en ville. Ce choix de capacité, puissance pour la batterie et d'autonomie du véhicule définit les composants et, *a fortiori* les coûts de fabrication, d'achat et d'entretien. Nous pouvons donc dégager quelques cas d'usage, illustrés par des profils de vitesse, fréquences d'utilisation et puissances de recharges.

2.3.1 Différents usages

L'usage est un facteur d'entrée dans notre outil de calcul. Nous avons donc établi quatre types d'usages dont les informations sont répertoriées sur la figure 9 (Annexe) : urbain, périurbain, rural et grand voyageur (Cf Complément 3.1 Annexe).

Respectivement, nous avons choisi des distances annuelles de 6000 km, entre 6000 et 18000, et plus de 18000 pour rural et grand voyageur.

2.3.2 Modélisation du profil de vitesse

Il s'agit de trouver un profil représentatif de la vitesse instantanée au cours d'un trajet caractéristique pour chaque type d'usage. La vitesse et l'accélération, stockées sous forme de tableau, seront entrées dans une modélisation d'une voiture électrique. Alors, nous pourrions estimer la puissance moyenne et la consommation énergétique idéale pour satisfaire les besoins de l'utilisateur.

L'algorithme utilisé pour la modélisation urbaine simule le déplacement de la voiture en imposant le passage par un feu tous les cent-cinquante mètres. Ce feu tricolore s'allume avec une probabilité (1/2). S'il est allumé, on force le freinage puis la voiture s'arrête pour une durée aléatoire entre 10 et 30 secondes.

Pour le cycle périurbain, on modélise la nationale ou l'autoroute par une ligne droite sur laquelle on dispose des embouteillages. La distance et la longueur de ces ralentissements sont tirées au hasard dans les proportions observées en France.

La multitude des trajets possibles pour l'utilisateur rural nous a conduit à utiliser le cycle WLTP (*Worldwide harmonised Light vehicle Test Procedure*) qui mélange en outre différents types de conduite et s'approche de la pluralité de l'usage rural.

Une vitesse constante à cent kilomètres-heure est utilisée pour modéliser l'usage grand-voyageur.

Les différents profils de vitesse sur un trajet d'une heure sont affichés sur la figure 10 (Annexe).

2.3.3 Fréquence de recharge

Intuitivement, il suffit d'avoir la quantité totale de kilomètres parcourus pendant l'année et l'autonomie pour obtenir la fréquence des recharges. Si l'on note D le total de kilomètres par an et A l'autonomie de la voiture, il vient :

$$N_{\text{Rech}} = \lceil D/A \rceil \quad (4)$$

D'où la fréquence de recharge (en recharge/semaine) :

$$F_{\text{Rech}} = N_{\text{Rech}}/52 \quad (5)$$

2.3.4 Coût de l'énergie

Le prix total en énergie sur la durée de vie du véhicule est donné par la formule suivante :

$$P_{\text{E}} = N_{\text{Rech}} \times C_{\text{E}} \times C \times D_{\text{Vie}} \quad (6)$$

avec D_{Vie} la durée de vie en années, C_{E} le coût de la source d'énergie (considéré constant, pas de prévision) en euros/L ou euros/kWh et C la capacité en L ou kWh.

2.3.5 Consommation énergétique

Dans le but de déterminer la consommation énergétique des véhicules électriques, nous avons utilisé un programme informatique avec le langage python qui se fonde sur les équations de la dynamique. Comme première équation, nous avons :

$$m_{eq} \frac{dv}{dt}(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)) \quad (7)$$

avec m_{eq} la masse du véhicule et les masses inertielles des parties en rotations (roues, moteurs).

F_t : la force de traction exercée par le système de transmission.

F_a : la force aérodynamique de résistance

F_r : la force de roulement

F_g : la force de pesanteur

$$F_r(t) = c_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \text{ et } F_a(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot SC_x \cdot v^2 \quad (8)$$

c_r : coefficient de roulement

ρ : densité de l'air

θ : pente

SC_x : le coefficient de traînée multiplié par la surface frontale exposée à l'air (en mètre carré).

Le cycle de conduite choisi fixe la valeur de l'accélération et de la vitesse de la voiture. Avec cette équation, nous pouvons donc déterminer la valeur de la force nécessaire F_t à partir de laquelle on détermine le couple moteur (en tenant compte de pertes liées aux frictions sur toute la chaîne de transmission).

$$C_m(t) = \frac{F_t(t)}{r \cdot \gamma} + C_{friction} \text{ et } w_m(t) = \frac{v(t)}{r} \cdot \gamma \quad (9)$$

r : le rayon des roues

γ : le rapport de réduction de la transmission

La valeur de la vitesse de rotation du moteur et celle du couple moteur nous fournissent alors la puissance mécanique fournie par le moteur. Ensuite, avec les rendements du moteur électrique ainsi que de la batterie/Pile à combustible, on détermine l'énergie électrique nécessaire à insérer dans le système par intégration de la puissance. Dans le cas où la puissance électrique est négative, nous avons pris en compte le freinage régénératif qui permet de récupérer 11% de la puissance de freinage (en réalité la partie que l'on peut récupérer dépend du type de freinage et de la décélération mais on a choisi une valeur moyenne) :

$$E_{consommée} = \int_0^T \frac{C_m(t) \cdot w_m(t)}{\eta_{moteur} \cdot \eta_{batterie/pile}} dt \quad (10)$$

Dans la modélisation, nous avons fixé des valeurs telles que le coefficient de roulement, la taille des

roues, les paramètres inertiels des composants, le rapport de transmission et les rendements des composants. La masse du véhicule, qui apparaît comme le facteur prédominant dans la consommation, (voir figure 12 Annexe) ainsi que son coefficient de résistance à l'air SC_x , dont l'impact apparaît surtout à vitesse élevée (voir figure 11), ont été modifiés en fonction du type de véhicule.

On obtient alors en divisant par la distance, pour une voiture à hydrogène une consommation en $\text{kgH}_2/100\text{km}$ (avec l'équivalent $33\text{kWh}/\text{kgH}_2$) et une consommation en $\text{kWh}/100\text{km}$ pour une voiture à batterie.

Pour les voiture HEV, ICEV, nous avons utilisé un graphique (figure 14 Annexe) qui donne la consommation des véhicules en fonction de leur masse. A partir de ces données on a moyenné les valeurs et on a modélisé la loi de consommation en fonction de la masse par une fonction polynomiale de degré 2. Ensuite, à l'aide des données des constructeurs, nous avons augmenté ou diminué cette consommation en fonction du cycle de conduite. Sur l'autoroute et en zone urbaine, la consommation est légèrement supérieure à la moyenne, sur les routes rurales, la consommation est plus faible.

Pour les PHEV, pour chaque cycle de conduite, on a défini un ratio d'utilisation pour la partie électrique et thermique (5/95 sur autoroute, 30/70 en zone rural, 50/50 en zone périurbaine, 70/30 en zone urbaine) et à l'aide des modèles pour les BEV et ICEV, on en a déduit les consommations énergétiques pour chaque partie.

Nous avons répertorié les consommations des voitures pour chaque cycle de conduite, pour chaque type de véhicule sur les figures 14/15 (Annexe).

Avec ces données, les coûts environnementaux et économique peuvent être calculés sur une durée de vie totale (le facteur d'émission du mix électrique en CO_2/kWh nous permet d'évaluer l'émission en CO_{2eq} pour les véhicules à hydrogène et à batterie).

2.4 Dimensionnement

L'objectif de la partie est de déterminer les tailles caractéristiques (proportionnelles au prix) à donner aux batteries, piles à combustible et leurs réservoirs d'hydrogène, afin de subvenir aux besoins du véhicule (Cf Complément 4.1 Annexe).

2.4.1 Les véhicules hybrides, HEV et PHEV

Pour ces deux types d'hybrides, non rechargeable et rechargeable, nous avons opté pour deux stratégies (Cf Complément 4.2 Annexe). Pour les HEV, une batterie de capacité de 2 kWh est suffisante, en se basant sur les données des véhicules en circulation. Pour les PHEV, nous avons choisis une capacité adaptée à la distance quotidienne D (donnée d'entrée). Puisqu'en ordre de grandeur, 20 kWh permettent de réaliser 100

km (The Future of Hydrogen – Analysis, s. d.), la capacité à choisir serait donc :

$$C_{\text{PHEV}} = 20 \times D/100 \quad (11)$$

Comme ordre d'idée, les PHEV actuels ont des batteries de capacité de 5 à 20 kWh.

2.4.2 Les véhicules électriques, BEV

L'autonomie souhaitée va dimensionner la capacité de la batterie. Deux points importants abordés par Babin *et al* (Babin et al., 2018) sont à souligner, qui prévalent pour les 100% électriques étant donné que c'est la seule source de puissance.

Premièrement, les batteries ne sont fonctionnelles qu'avec un SoC (Etat de Charge) au-delà d'une valeur minimale SoC_{min} . Pour les batteries Li-ion, $SoC_{min} = 20\%$. Autrement dit, sur la capacité de la batterie seulement 80% seront utilisables.

Deuxièmement, les batteries s'usent : le SoC maximal auquel on peut charger une batterie est toujours inférieur à la capacité maximale initiale annoncée par les constructeurs, et diminue au fur et à mesure de l'utilisation de la batterie, en fonction principalement de la température d'utilisation.

Il est alors plus bénéfique de surdimensionner la batterie dans ces conditions là, de 50%, qui représente le bon équilibre entre surdimensionnement, et limitation du nombre de cellules de batteries à ajouter : cela permet de prolonger la vie de la batterie de 30 à 80% (Cf Complément 4.3 Annexe).

Enfin pour l'autonomie il faut pouvoir faire plusieurs distances quotidiennes, en prenant en compte qu'on ne peut avoir de recharges journalières. Selon les usages, on peut souhaiter une autonomie A de 150km à 300 km. La capacité de la batterie à mettre serait alors :

$$C_{\text{BEV}} = 1.5 \times 20 \times A/100 \quad (12)$$

2.4.3 Les véhicules à hydrogène, FCEV

On utilise encore un HESS (Hybrid Energy Storage System). La pile à combustible, à l'aide de l'hydrogène stocké, fournit au moteur électrique la majorité de la puissance. Cependant, celle-ci a une plage de fonctionnement limitée, et c'est pourquoi on ajoute une batterie (ou un supercondensateur). Gaikwad et Ghosh (Gaikwad Ghosh, 2020) apportent des éléments de réponse sur son dimensionnement. Lorsque la pile ne peut pas fournir assez de puissance pour le moteur, notamment lors de pics de puissance (phénomènes ponctuels) la batterie vient fournir ce qu'il manque. Mais elle est aussi utile lorsque la pile à combustible fournit trop de puissance : afin de ne pas perdre cette énergie surplus, un contrôleur des flux d'énergies redirige ce surplus dans la batterie (et la recharge). La batterie doit donc être suffisamment importante pour retenir le surplus d'énergie ainsi que

l'énergie du freinage régénératif. On peut alors définir, en fonction du *TurnDownRatio* (TDR) (représente la plage de fonctionnement de la pile), une zone de fonctionnement, et au sein de cette zone de fonctionnement, une zone optimale et une zone dans laquelle de l'énergie est gâchée car la pile est trop puissante pour la capacité de la batterie. Pour choisir la taille des batteries on s'est donc placé sur les frontières de cette zone optimale dont les fonctions représentatives sont données en annexe (Cf Complément 4.4 Annexe). Concernant la capacité du réservoir d'hydrogène, il faut prendre en compte l'autonomie. En considérant qu'il faut 1 kg d'hydrogène pour faire 100 km (en réalité il en faut moins mais cela permet d'avoir de la marge), un réservoir doit pouvoir stocker autonomie/100 kg de H_2 , soit entre 3 et 5 kg de H_2 (Cf Complément 4.5 Annexe).

3 Résultats

Pour obtenir un ordre de grandeur du TCO, il suffit de calculer chaque prix P puis de les sommer. Il vient :

$TCO = P_{\text{Voiture}} + P_{\text{Energie}} + P_{\text{Entretien}} + P_{\text{Assurance}}$
 Les résultats sont présentés ci-dessous dans Figure R. Les caractéristiques des véhicules utilisés sont dans la Table 9 (Annexe). Notamment grâce au bonus écologique et un faible coût de l'électricité, les véhicules électriques semblent les moins onéreux : 27€/100km contre 34€/100km pour un véhicule essence. Quant au modèle FCEV, les prix encore haut de l'hydrogène et de la fabrication des piles à combustible n'en font pas une bonne alternative économique : 44€/100km. Du côté de l'émission de CO_2eq , la conception des FCEV et BEV est plus émettrice que pour un véhicule conventionnel, mais la faible empreinte carbone d'utilisation compense très rapidement le déficit. Ainsi, les BEV comme les FCEV émettent en moyenne respectivement 14 et 15 $kgCO_2eq/100km$, soit presque deux fois moins que les ICEV (26 $kgCO_2eq/100km$). Les PHEV et HEV sont un intermédiaire (en émission de CO_2 et économique) entre les ICEV et les BEV, ce qui paraît cohérent avec l'hybridation (les PHEV sont plus coûteuses énergétiquement en énergie du fait des batteries plus importantes mais émettent moins au cours de la durée de vie grâce à la recharge électrique). Ainsi, les véhicules électriques à batterie émettent moins de CO_2 au km et peuvent même coûter moins cher que les ICEV avec un prix de l'électricité relativement bas. Le véhicule à hydrogène a lui un coût supérieur aux autres types de véhicules et son émission de CO_2 dépend très fortement du pays producteur d'électricité, ce qui en fait une alternative écologique possible mais pas universelle. Cependant, les matériaux rares utilisés poseront certainement un problème de gestion des quantités dans un avenir plus électrifié.

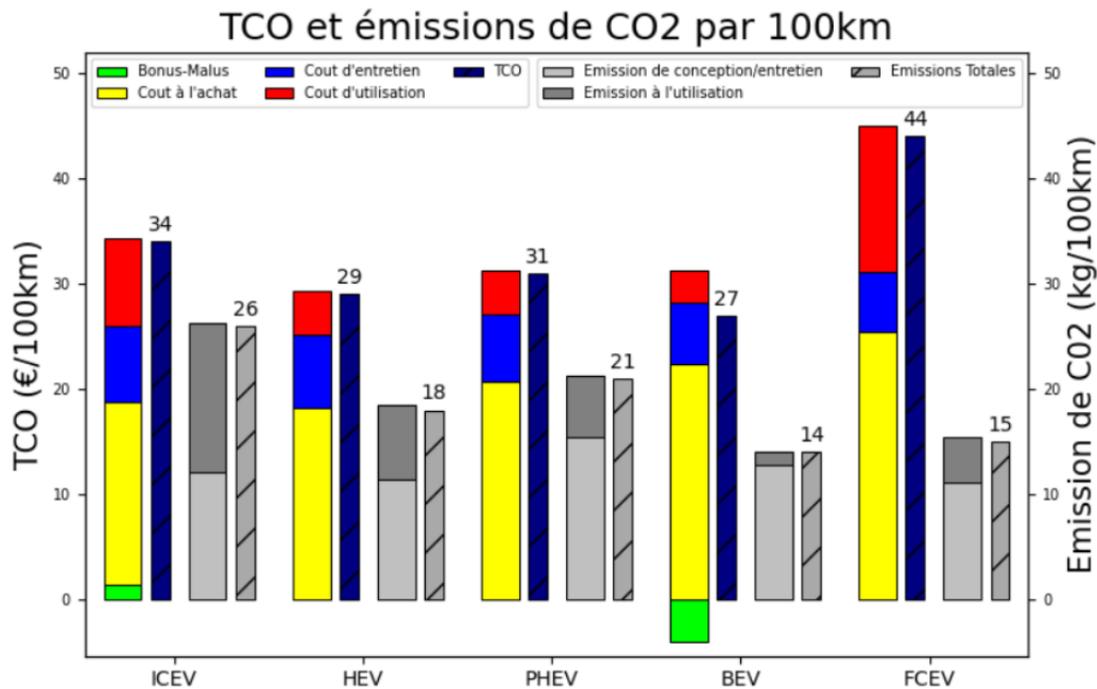


Figure R - TCO et émissions CO_{2eq}/100km pour un véhicule compacte pour un cycle rural.

4 Discussions

Il faut noter que des hypothèses sur la durée de vie des batteries ou des éventuelles pannes ont été simplifiées. Le prix de l'entretien peut s'avérer être plus élevé qu'annoncé pour la voiture à batterie. En raison des législations changeantes, les coûts variables bonus/malus peuvent d'ailleurs varier selon les régions et les années. De même l'évolution du prix de l'énergie n'a pas été prise en compte.

La consommation pour le véhicule électrique doit aussi être calculée de manière plus fine et c'est pourquoi le modèle présenté ci-dessus a été utilisé.

Des critiques peuvent être émises sur la modélisation de la vitesse, cependant, une observation de la circulation en ville nous a conduit à utiliser ce modèle qui représente au mieux la réalité.

Pour approfondir le travail réalisé, la prise en compte du chauffage, et des différents composants de la voiture (GPS, tableau de compteur) peuvent aussi modifier la consommation énergétique.

De plus, nous n'avons pas pris en compte le recyclage et la gestion des déchets dans l'étude.

Les émissions à l'utilisation des véhicules électriques sont à nuancer. Lors de notre étude,

nous avons choisi un mix électrique français (80gCO_{2eq}/100km). Avec un mix électrique fortement carboné, chinois par exemple (700gCO_{2eq}/100km), les émissions à l'utilisation sont fortement modifiées et on voit que les FCEV sont beaucoup plus émettrices en CO₂ que les ICEV (voir les figures 15 et 16). Les émissions lors de l'utilisation dépendent donc grandement de la manière dont a été produite l'électricité.

Aussi, concernant le dimensionnement des pièces, celui-ci pose un problème majeur dans l'industrie automobile, car il n'existe pas une méthode unique et parfaite pour avoir des résultats. On peut trouver des méthodes heuristiques, tout comme des simulations. Les algorithmes utilisés sont souvent très complexes, avec des temps de calculs de plusieurs dizaines d'heures : dans notre étude, nous avons privilégié une approche très simple mais aussi pragmatique.

Et les résultats sont obtenus pour une conduite optimale. Or pour les véhicules hybrides à deux modes de fonctionnement, notamment les PHEV (mais aussi les FCPHE, non traités dans le code), la réalité montre une irrégularité et une faible proportion à l'utilisation de l'électrique lorsque cela est possible et même conseillé.

II - Optimisation de la production énergétique

5 Introduction

Le réchauffement climatique est l'enjeu majeur auquel notre génération va devoir faire face, et le domaine du transport est l'un des plus gros contributeurs de ce réchauffement. Réussir une transition, partielle ou complète, du parc automobile vers un modèle plus propre serait déjà un grand pas en avant. Mais à quel prix cette transition énergétique peut-elle se faire? Combien coûteront les modifications du système actuel?

Dans cette étude, nous optimisons les coûts liés à l'énergie en France et déterminons la composition des mix énergétiques associés.

6 Méthodologie

Pour optimiser ces coûts, nous utilisons un algorithme d'optimisation codé en langage Python à l'aide des modules `pandas` et `pyomo` qui détermine le mix électrique le moins coûteux et son coût.

Tous nos calculs et modèles mathématiques se basent sur celui d'origine présenté ci-dessous :

Cost function : $\min_{x, \bar{x}} \sum_i (\beta_i \bar{x}_i + \sum_t \pi_i x_{it})$
 π_i , marginal cost, β_i fixed annualized cost

Power limit *s.t* : $0 \leq x_{it} \leq a_{it} \bar{x}_i$
 \bar{x}_i installed power, a_{it} availability

Meet demand : $\sum_i x_{it} \geq C_t$
 C_t Consumption

La première permet de calculer les coûts relatifs à la production d'énergie, les deux autres, de respecter les contraintes physiques liées à cette production : la deuxième permet de donner un seuil de production maximale à tout instant et la troisième exige que la production soit supérieure à la demande.

Nous y ajoutons progressivement la présence de l'hydrogène, des électrolyseurs, et affinons les modélisations les concernant dans les mix électriques ou dans le parc automobile. Nous avons construit différents modèles mathématiques successifs, en établissant des contraintes mathématiques sous forme d'équations reliant les paramètres d'entrée et les variables à optimiser, que nous avons ensuite implémenté dans le programme. Nous avons ensuite simulé les modèles en faisant varier les scénarios (et donc les paramètres d'entrée).

7 Modélisations

7.1 Modèle 1 : électrolyseurs

Dans ce premier modèle, nous nous intéressons à la consommation supplémentaire d'électricité en France occasionnée par la production d'hydrogène par électrolyse. Ce modèle prend en paramètre les coûts des différentes sources d'énergie (coûts fixes annualisés et coûts marginaux) ainsi que ceux des électrolyseurs, et la demande annuelle d'hydrogène en France. Il optimise les quantités d'énergie produite par les sources d'électricité, leur puissance installée, la capacité des électrolyseurs et leur consommation électrique.

Paramètres :

- a_{it} : disponibilité des moyens de production, heure par heure [p.u]
- C_t : demande en électricité heure par heure sur un an [MWh]
- C_{H_2} : demande annuelle en H2 [MWh]
- β_i : couts fixes annualisés des moyens de production [€/MW/an]
- β_{H_2} : couts fixes annualisés de l'électrolyseur [€/MW/an]
- η_{H_2} : rendement de l'électrolyseur [p.u]

Variables :

- \bar{y}_{H_2} : capacité électrolyseurs [MW]
- $y_{H_2,t}$: consommation électrique par les électrolyseurs [MWh]
- \bar{x}_i : capacité installée du moyen de production i [MW]
- $x_{i,t}$: production d'électricité du moyen de production i [MWh]

On a donc les équations suivantes :

$$\min_{x, \bar{x}, y_{H_2, t}} \left(\beta_{H_2} \bar{y}_{H_2} + \sum_{i \in prod} (\beta_i \bar{x}_i + \sum_t \pi_i x_{it}) \right) \quad (13)$$

le terme de gauche représente les technologies de consommation :

$$0 \leq y_{H_2, t} \leq a_{H_2} \bar{y}_{H_2} \quad (14)$$

$$0 \leq x_{i, t} \leq a_{it} \bar{x}_i \quad \forall i \in prod \quad (15)$$

$$\sum_t y_{H_2, t} \eta_{H_2} \geq C_{H_2} \quad (16)$$

$$\sum_i x_{it} \geq C_t + y_{H_2, t} \quad \forall t \quad (17)$$

Simulation 1 : avec le grand mix électrique (mélange de toutes les technologies, voir annexe), sans hydrogène : 492 TWh d'électricité produite pour 22,13 Md d'euros en un an.

Simulation 2 : même mix avec 1 TWh d'hydrogène produits : 493 TWh produits pour 22,16 Md d'euros.

On constate que lorsqu'il y a une demande en hydrogène, la consommation électrique augmente (car dans ce modèle on considère que le seul moyen de production de l'hydrogène est l'électrolyse). On peut connaître le prix de cette augmentation et donc indirectement, le prix de 10TWh d'hydrogène en soustrayant le prix total sans demande en hydrogène à celui avec 10TWh de demande.

On trouve alors dans ce modèle que l'hydrogène coûte 30M€/TWh contre 17M€/TWh pour l'électricité en France donc presque deux fois plus cher.

7.2 Modèle 2 : piles à combustible

Dans ce modèle, nous ajoutons à la production électrique française la production d'électricité par pile à combustible, à partir de l'hydrogène produit par électrolyse. La pile à combustible serait principalement utilisée pour garantir la flexibilité du réseau, en envoyant de l'électricité lorsque la demande ne peut être complètement satisfaite par les autres sources d'électricité.

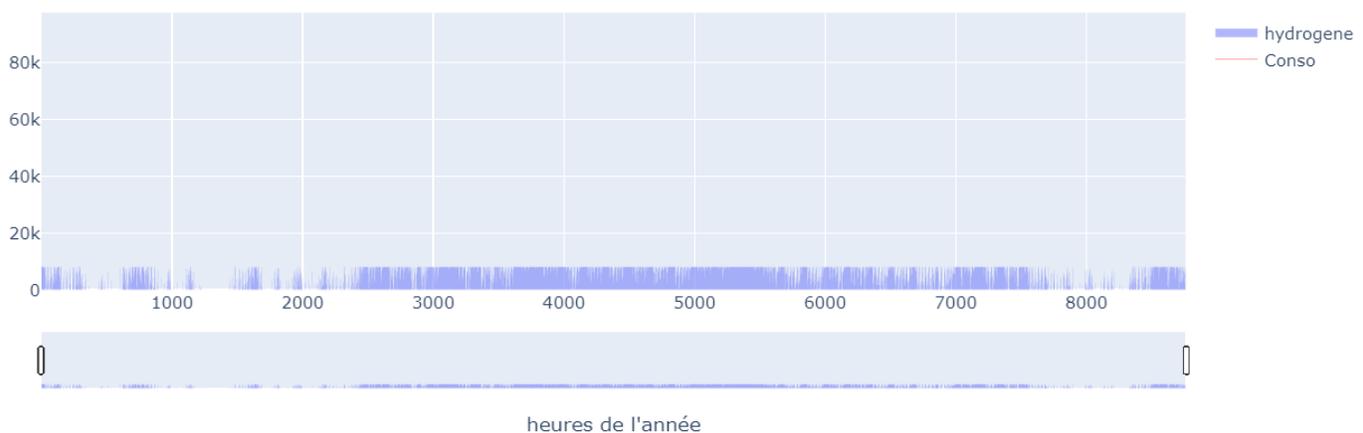
Paramètres :

- η_{PAC} : rendement pile à combustible [p.u]
- β_{PAC} : coûts fixes annualisés des piles à combustible [€/MW/an]

Variables :

- $x_{PAC,t}$: production d'électricité par les piles à combustibles à chaque instant [MWh]
- \bar{x}_{PAC} : capacité installée des piles à combustible [MW]

Production hydrogène (en KWh)



7.3 Modèle 3 : proportion voitures propres

Ce modèle, à partir d'une flotte française totale de véhicules à batterie et à hydrogène, optimise la proportion de véhicules à hydrogène parmi ceux-ci. Il prend en compte le stockage et le transport de l'hydrogène.

On conserve les équations précédentes, auxquelles on ajoute 2 nouvelles équations :

$$0 \leq \sum_t x_{PAC,t} \leq \eta_{PAC} \left(\sum_t y_{H_2,t} \eta_{H_2} - C_{H_2} \right) \quad (18)$$

$$0 \leq x_{PAC,t} \leq \bar{x}_{PAC} \beta_{PAC} \quad \forall t \quad (19)$$

Simulation 4 : grand mix + pac, 1 TWh d'hydrogène : 494 TWh produits pour 21,8 Md euros

Simulation 5 : grand mix + pac, 10 TWh d'hydrogène : 507 TWh pour 22,13 Md euros

Avec des simulations identiques au modèle précédent on trouve que le prix total est réduit de 300 M euros pour une demande de 10TWh de H_2 et pour une demande de 1TWh de H_2 . Ainsi les piles à combustible permettent d'économiser 300 M euros au premier ordre selon la demande en hydrogène

Sur le graphe suivant, traduisant le fonctionnement des électrolyseurs au cours de l'année, on voit qu'ils ont fonctionné de manière plus marquée pendant l'été : ce résultat nous indique que lors de périodes de plus faible demande, il est plus intéressant économiquement de stocker de l'électricité sous forme d'hydrogène plutôt que de réduire la production ce qui explique les économies réalisées. Ce modèle ne prend pas en compte les coûts de stockage et de transport du H_2 donc ce n'est pas entièrement vrai mais il est cependant intéressant de remarquer ce phénomène.

drogène.

Paramètres :

- $C_{VE,t}$: consommation véhicule électrique heure par heure [MWh]
- N_{tot} : Nombre de véhicules à satisfaire (batterie+hydrogène)

- C_{FCV,H_2} : consommation annuelle d'hydrogène par un seul véhicule [MWh]
- C_s : prix du stockage de H_2 [€/MWh]
- $C_{FCV,t}$: Consommation véhicules hydrogène heure par heure [MWh]
- C_{tr} : coût de transport de l'hydrogène
- d_{tr} : distance de transport de l'hydrogène

Variables :

- N_{bat} : Nombre de véhicule à batterie
- N_{H_2} : Nombre de véhicules à hydrogène
- t : coût de transport de l'hydrogène, dépendant uniquement de la distance de transport et de la quantité de H_2
- V_s : volume stocké [MWh]

On conserve les équations (2), (3), (7) du modèle précédent et on ajoute :

$$N_{tot} = N_{bat} + N_{H_2} \quad (20)$$

$$\min_{x, \bar{x}, y_{H_2}, \bar{y}_{H_2}} \left(C_3 + \beta_{H_2} \bar{y}_{H_2} + \sum_{i \in prod} (\beta_i \bar{x}_i + \sum_t \pi_i x_{it}) \right) \quad (21)$$

$$C_3 = V_s C_s + \left(\sum_t \frac{x_{PAC,t}}{\eta_{PAC}} + C_{FCV,H_2} N_{H_2} \right) C_{tr} d_{tr} \quad (22)$$

$$N_{H_2} \frac{C_{FCV,H_2}}{8760} \leq V_s \quad \forall t \quad (23)$$

$$\sum_i x_{it} \geq C_t + y_{H_2,t} + N_{bat} C_{VE,t} \quad \forall t \quad (24)$$

$$\sum_t y_{H_2,t} \eta_{H_2} \geq \sum_t \frac{x_{PAC,t}}{\eta_{PAC}} + C_{FCV,H_2} N_{H_2} \quad (25)$$

Simulations avec 100% de voitures propres :

On a considéré 40 M de voitures, avec le mix complet -100 % H_2 55.47 Md euros (simulation 6)

-100 % électrique 53.54 Mds euros (simulation 7)

-avec optimisation de la part de voitures à hydrogène : 37% de voitures à hydrogène, 49.70 Md euros pour 1328 TWh (simulation 8)

On constate que lorsque la flotte est 100 % hydrogène le prix est plus élevé que lorsque la flotte est 100 % électrique, ce qui est cohérent car l'hydrogène coûte plus cher à produire que l'électricité.

Cependant le ratio optimal est compris entre les deux : la combustion dans les piles à combustible de l'hydrogène stocké présente une perte d'énergie, il est donc préférable de réutiliser cet hydrogène dans une partie de la flotte automobile.

On peut par ailleurs calculer alors le coût total de la flotte propre : $49.70 - 22.13 = 27.57$ Mds euros

On utilise le modèle 3, avec moins de technologies (voir annexe) :

TOTAL : 59.36 Mds euros

Pourcentage voitures hydrogène : 41%

Pour une simulation identique sans les piles à combustible, c'est à dire sans technologie permettant de réutiliser l'hydrogène sous forme d'électricité (donc en supposant que tout le H_2 produit est destiné aux voitures H_2) on trouve alors :

TOTAL : 59.44 Mds euros

Pourcentage voitures hydrogène : 47%

Les piles à combustible permettent donc d'économiser 75M d'euros. On remarque que la proportion de voitures à hydrogène augmente sans les PAC, ce qui est logique car l'hydrogène produit ne peut plus être reconverti en électricité.

Dans tous les cas, on garde tout de même une grande proportion de voitures à hydrogène, ce qui semble inattendu car il faut beaucoup plus d'électricité au global pour faire fonctionner une voiture à hydrogène qu'une voiture à batterie. Cependant, on peut interpréter ces résultats par le fait que la production d'hydrogène permet dans certains cas le stockage de l'électricité et donc permet parfois au réseau de produire de l'électricité "gratuitement" ce qui peut minimiser les dépenses.

Enfin, l'ordre de grandeur de la dépense totale pour l'énergie (60Mds euros) est cohérent, environ 3 fois plus que dans le cas actuel, sachant qu'on rajoute dans ce modèle près de 40 000 000 de véhicules à recharger sur le réseau. En estimant donc qu'en moyenne un français consommera 3 fois plus d'électricité, sachant que la dépense moyenne actuelle est de 816 euros par an environ, on trouve que la dépense serait de 2450 euros en moyenne. Or un Français dépense en moyenne 6000 euros par an en essence/diesel, donc l'économie serait plutôt conséquente. Cette dépense totale est essentiellement allouée aux centrales nucléaires, qui fournissent en électricité les électrolyseurs. Ce scénario paraît donc peu réalisable, au vu des tendances actuelles qui visent à réduire la part du nucléaire dans la production électrique et non pas l'augmenter considérablement comme cela serait le cas ici.

III - Coût du renforcement des infrastructures de recharge des véhicules à batterie

8 Introduction

Le but de ce projet est d'évaluer le coût réel de l'infrastructure de recharge pour véhicules à batterie, en tenant compte de différents cas d'usage et scénarios de pénétration des véhicules à batterie. Il s'agira notamment d'estimer le coût du renforcement du réseau à prévoir.

Nous effectuons différents modèles et calcul du coût des infrastructures selon la topologie et les données du réseau de CIGRE benchmark grid. CIGRE est l'acronyme de Conseil international des grands réseaux électriques qui est une organisation mondiale dans le domaine de l'électricité à haute tension.

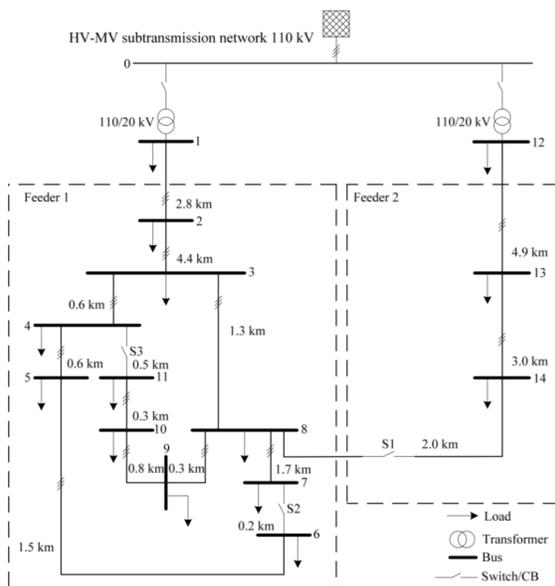


FIGURE 1 – CIGRE benchmark grid

9 Estimation de la demande de recharge des véhicules électriques

La voiture électrique ayant une autonomie plus faible (pour la grande majorité des modèles) que les voitures essence, elle se destine, au moins dans un premier temps, à un usage local et urbain. Cela correspond à de faibles distances ($< 50\text{km}$), essentiellement pour se rendre à son lieu de travail et effectuer des déplacements locaux.

Nous nous sommes intéressés à la demande dans une grande métropole comme Paris, à celle dans une ville de taille moyenne ($> 100\text{k}$ habitants), et enfin à la demande dans une zone à dominante rurale.

À l'aide de l'enquête nationale transports et déplacement, nous avons obtenu les distances moyennes parcourues par les véhicules dans ces différentes zones.

Ensuite, en prenant une consommation moyenne de $20 \text{ kWh}/100 \text{ km}$ pour les véhicules électriques, ce qui correspond à la consommation de la Tesla modèle 3 et de la Renault Zoé, nous avons pu estimer la consommation moyenne journalière des véhicules électriques pour les différentes zones.

Nous faisons varier les paramètres suivants :

- Taux de pénétration (TP) des véhicules électriques (de 25 à 75%)
- Zone considérée : Paris, petite ville ($> 100\text{k}$ habitants), ou zone rurale
- Distribution de la recharge, c'est-à-dire où et quand les usagers rechargent leur voiture

10 Stratégies de chargement

Nous avons supposé que les usagers rechargent leur voiture lorsqu'ils perdent environ 100km d'autonomie, soit environ 20 kWh . De plus, nous supposons que le chargement des véhicules a uniquement lieu sur le réseau domestique. Sachant que les prises domestiques délivrent une puissance d'environ 3 kW , cela correspond à une recharge de 7h.

10.1 Première modélisation : Gaussienne sur 20h

On suppose que les usagers rechargent leur voiture lorsqu'ils rentrent à leur domicile le soir. L'heure d'arrivée des usagers à leur domicile suit une gaussienne centrée sur 20h.

10.2 Seconde modélisation : Bimodale centrée sur 8h et 20h

On suppose que les usagers rechargent à la fois sur leur lieu de travail (gaussienne centrée sur 8h) et à la fois à leur domicile (gaussienne centrée sur 20h). Si d_8 et d_{20} sont les amplitudes des gaussiennes de 20h et de 8h, on a $d_8 = \alpha$ et $d_{20} = 1 - \alpha$. On règle alors le facteur α de manière à avoir le plus grand FACTOR (on définit FACTOR comme le nombre tel que $\text{demande} \times \text{FACTOR} = \text{capacité du réseau}$, voir section 5 pour plus de précision), ce qui arrive lorsque les pics du matin et du soir de la demande totale sont de même amplitude.

10.3 Troisième modélisation : Pilotage de la demande

On applique un délai de 4h avant le début de la recharge afin d'éviter le pic de consommation des mé-

nages vers 20h.

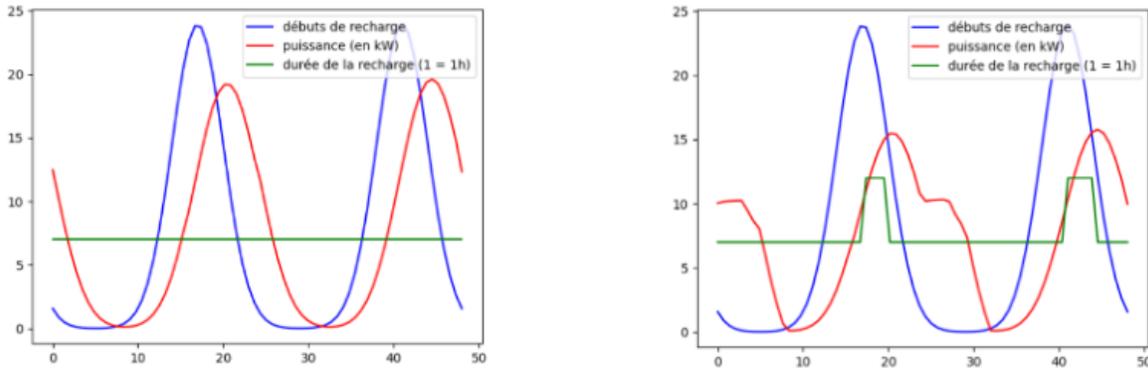


FIGURE 2 – demandes en puissance sur deux jours obtenues avec les mêmes paramètres $d(t)$ (en bleu) et E , mais avec des fonctions $Tr(t)$ (en vert) différentes. L'unité de temps est l'heure.

11 Programme Python

La recharge des voitures représente une certaine demande en puissance qui varie au cours de la journée. Différents profils de demande sont imaginables et il a donc fallu réaliser plusieurs modèles. Pour ce faire, un code python a été programmé. Celui-ci renvoie un profil de puissance calculé selon les variables suivantes :

- E : l'énergie totale consommée pour la recharge des batteries sur 24h. Cette valeur correspond donc à l'aire sous la courbe du profil de puissance recherché.
- $d(t)$: La densité de probabilité qu'une personne commence sa recharge. L'intégrale de d sur 24 heures vaut 1.
- $Tr(t)$: Le temps de recharge des véhicules qui se branchent à l'instant t .

Le principe de l'algorithme est le suivant : Pour calculer la puissance à un instant t , on cherche à déterminer la densité de personnes qui sont en charge à cet instant. Puis on calcule l'intégrale de la fonction obtenue pour pouvoir la normaliser et faire en sorte que l'intégrale vaille E . Il est possible de faire varier Tr de manière à éviter les pics trop importants de puissance. Par exemple, une stratégie est d'augmenter le temps

de recharge lors des heures de pointes pour diminuer la puissance demandée (figure 2).

12 Programme Matlab

Nous avons utilisé un programme Matlab fourni par nos encadrants afin de mesurer l'impact sur le réseau domestique de cette demande additionnelle. En cas de surcharge sur le réseau, nous calculons le **FACTOR** tel que $FACTOR * demande = capacité$ de la grille. Ainsi, en connaissant le coût d'un tel réseau et le **FACTOR** maximal pour chaque simulation, nous avons estimé le surcoût nécessaire pour à niveau le réseau.

13 Coût

Pour calculer le coût de la grille, nous considérons 200k euros par km de ligne enterrée et 70k euros par km de ligne aérienne. Selon notre modèle CIGRE benchmark grid, le coût pour construire la grille est environ sept millions d'euros. Nous avons calculé le coût total pour la zone concernée ainsi que le coût ramené au nombre d'habitants de la zone concernée.

14 Résultats et interprétation

14.1 Résultats

TABLE 1 – Résultats Paris

	Factor modèle 1	Coût en millions €	Coût par personne en €	Factor modèle 2	Coût en millions	Coût par personne en €	Factor modèle 3	Coût en millions	Coût par personne en €
TP=0.25	0.90	1.4	0.4	0.95	0.7	0.3	1.23	0	0
TP=0.50	0.75	4.3	1.3	0.90	1.4	0.7	1.06	0	0
TP=0.75	0.60	8.6	2.7	0.70	5.6	2.8	0.91	1.3	0.6

TABLE 2 – Résultats zone rurale

	Factor modèle 1	Coût en millions €	Coût par personne en €	Factor modèle 2	Coût en millions	Coût par personne en €	Factor modèle 3	Coût en millions	Coût par personne en €
TP=0.25	0.38	194	19	0.48	129	13	0.67	59	6
TP=0.50	0.20	475	47	0.25	356	35	0.42	164	16
TP=0.75	0.13	794	79	0.18	541	54	0.30	277	28

TABLE 3 – Résultats ville taille moyenne

	Factor modèle 1	Coût en millions €	Coût par personne en €	Factor modèle 2	Coût en millions	Coût par personne en €	Factor modèle 3	Coût en millions	Coût par personne en €
TP=0.25	0.56	43	5	0.65	30	3.5	0.86	9	1
TP=0.50	0.34	107	12.6	0.35	102	12	0.59	38	4.5
TP=0.75	0.23	185	21.7	0.24	175	20.6	0.45	67	7.9

Modèle 1 : Gaussienne sur 20h

Modèle 2 : Gaussienne avec retard 4h

Modèle 3 : Bimodale sur 8h et 20h avec des amplitudes optimales

14.2 Intepréétation

1. Le pic de consommation des ménages vers 20h est le principal facteur limitant car il atteint presque 100% de la capacité de la grille. Un délai 4h de rechargement permet d'éviter ce pic et donc de réduire les coûts en infrastructure.

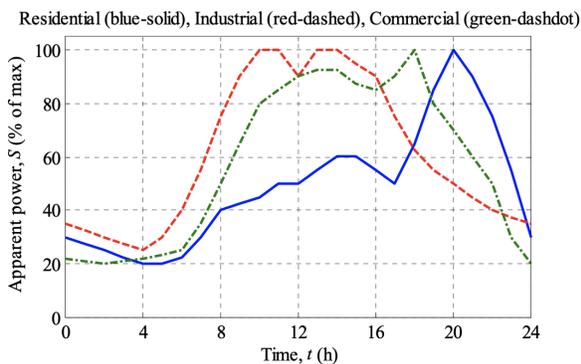


FIGURE 3 – Profils de charge quotidien du réseau de distribution LV

2. Cependant, pour un taux de pénétration élevé, un nouveau facteur limitant apparaît : le pic de la demande de recharge des EV's. C'est pour cela qu'entre le modèle 1 et 2 pour une ville de

taille moyenne le FACTOR ne diminue plus.

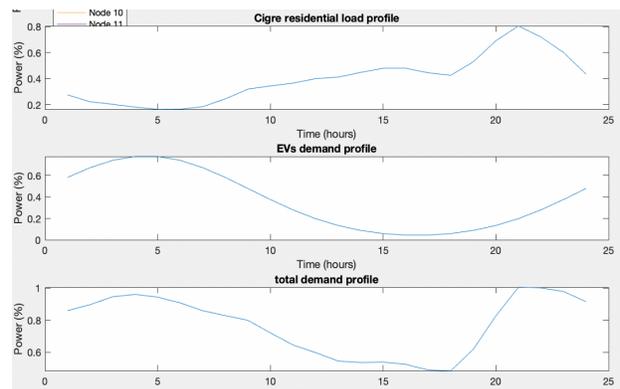


FIGURE 4 – demande résidentielle, demande véhicules électriques, demande totale

3. Si la recharge s'effectue en partie à la maison (en commençant autour de 20h) et sur le lieu de travail (en commençant autour de 8h), la nouvelle demande électrique peut être plus facilement accommodée. Elle laisse même encore de la marge quand le facteur dépasse 1.
4. On peut expliquer la différence de coût entre les zones rurales et urbaines par le temps de trajet qui sont en moyenne plus longs en zone rurale, mais surtout par la proportion de voi-

tures par habitants (75% en zone rurale contre 50% en zone urbaine)

5. Si les coûts de renforcement du réseau peuvent paraître important, ils semblent bien plus raisonnables ramenés au nombre d'habitants (au maximum 79€ en zone rurale sans pilotage contre 28€ avec pilotage)

15 Conclusion

Sans pilotage de la recharge (recharge « naturelle »), les appels de puissance seraient principalement concentrés sur la plage 19-21h. D'autres petites

pointes sont susceptibles d'intervenir au cours de la journée, notamment à l'arrivée sur le lieu de travail. Sans pilotage, un renforcement du réseau sera donc nécessaire. Si le coût d'une grille de distribution est très cher, le coût ramené à la population concernée semble tout à fait raisonnable.

Le pilotage de la recharge présente néanmoins un intérêt évident pour lisser ces recharges et ainsi amoindrir le coût de renforcement du réseau.

Par ailleurs, le pilotage permettrait par exemple d'adapter la consommation, à l'échelle de la journée et de la semaine, aux variations de la production solaire et éolienne.

IV - Evaluation du prix du kilogramme de H₂ à la pompe

16 Introduction

Alors que la question environnementale s'impose progressivement dans notre société post-industrielle où la majorité des moyens de transport rejettent massivement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, des technologies font surface pour tenter de palier à ce problème. Une de ces technologies est celle des véhicules à dihydrogène. En effet, la combustion de dihydrogène dans l'automobile produit de l'électricité et ne rejette que de la vapeur d'eau. Cependant, pour que le dihydrogène soit aussi compétitif que l'essence au niveau du prix à la pompe pour une même quantité d'énergie, il faut que son prix ne dépasse pas 6.50 € au kilogramme. L'objectif de ce mini-projet est d'étudier la viabilité économique de la construction d'une station à dihydrogène sur le territoire français. Pour cela on distinguera les cas d'achat de dihydrogène par la station auprès d'un fournisseur extérieur et de production du dihydrogène nécessaire sur place avec ou sans éolienne dans le but de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Dans les deux cas on modélisera les coûts fixes et d'entretien, notamment au niveau des composants et des ressources nécessaires à l'électrolyse de l'eau.

17 Modélisation

17.1 Analyse de la demande

La modélisation de la demande est un point essentiel à développer, elle permet d'une part d'indiquer comment le parc de véhicules électriques doit évoluer pour que la station d'hydrogène soit compétitive par rapport aux énergies fossiles actuellement utilisées et d'autre part, elle donne une idée du dimensionnement de la station. On peut ainsi calculer les besoins en matériel, en main d'oeuvre et en quantité d'hydrogène. Nous avons ici choisi une approche probabiliste, de la même manière que l'étude de Nistor et *al.* [1], du nombre de voitures et camions quotidiens en ne prenant pas en compte les éventuels véhicules utilitaires qui n'auront pas les mêmes besoins en hydrogène que les deux types de véhicules précédents.

Les nombres de voitures et de camions s'arrêtant quotidiennement à la station suivent des lois de Poisson de paramètres respectifs $\lambda_{voiture}$ et λ_{camion} . Nous supposons d'autre part, pour simplifier grandement les calculs, que la quantité d'hydrogène nécessaire à chaque voiture qui s'arrête est de 3.6 kg d'hydrogène et de 20 kg pour les camions. Ces quantités ont été déterminées en prenant pour voiture modèle la Toyota Mirai et pour camion modèle le Hyundai XCIENT

Fuel Cell, en considérant que le plein est fait dès que les réservoirs sont à 70% de leur capacité maximale, de la même façon que le font Zheng et *al.* [2] dans leur étude.

Pour exprimer le besoin total quotidien de la station, on multiplie le besoin de chaque véhicule par le nombre moyen de véhicules qui s'arrêtent, respectivement $\lambda_{voiture}$ et λ_{camion} pour les voitures et les camions auquel on ajoute l'écart type à savoir respectivement $\sqrt{\lambda_{voiture}}$ et $\sqrt{\lambda_{camion}}$ afin de prévoir une demande plus forte que la moyenne, on notera par ailleurs que le calcul montre que la probabilité d'un dépassement est de 0.25, ce qui n'est pas négligeable mais que l'on jugera ici acceptable.

La demande ainsi calculée est multipliée par 365 pour représenter la demande annuelle, nous ne distinguons pas les différents mois qui pourraient voir des demandes différentes, ni même les différents jours de la semaine.

17.2 Analyse des besoins en équipements

Nous déterminons à l'aide des nombres de voitures et de camions moyens par jour les besoins de la stations en certains équipements. A commencer par l'électrolyseur, dans le cas où l'hydrogène est produit directement à l'intérieur de la station. Nous choisissons pour cela un électrolyseur de la gamme McLyzer de l'entreprise française McPhy Energy, dont la fiche technique correspond à [7].

Nous calculons aussi le nombre de distributeurs dont la station a besoin pour éviter aux utilisateurs d'attendre trop longtemps avant de pouvoir faire le plein. Pour cela on modélise la fréquence d'arrivée des voitures γ à l'heure de pointe, dont la formule est donnée par [2] :

$$\gamma = \frac{\eta_d \eta_h C_d}{\bar{m}_{fill}} \quad (26)$$

Avec η_d le rapport de la demande aux heures de pointes sur la demande moyenne, η_h le rapport des heures de pointes sur les heures de fonctionnement de la station, C_d la capacité quotidienne de la station (ici on prend la demande quotidienne) et \bar{m}_{fill} correspond à la quantité d'hydrogène lors d'un plein moyen. Le choix des valeurs pour η_d et η_h est déterminé par la même étude d'où nous tirons la formule, avec $\eta_d = 1.19$ et $\eta_h = 8.2\%$. Cette fréquence nous permet de calculer le nombre de distributeurs nécessaires en supposant que, lors des heures de pointes, les voitures arrivent régulièrement à la station, nous négligeons en outre le temps d'attente éventuelle et nous

ne prenons en compte que le temps moyen pour faire le plein t_{refill} que nous estimons ici à environ 6 minutes, comme [2]. Pour éviter que deux automobilistes se "superposent" on définit le nombre de distributeurs N_d ainsi :

$$N_d = \left\lceil \frac{\gamma \cdot t_{refill}}{1440} \right\rceil + 1 \quad (27)$$

A partir des données sur les différents composants, on en déduit la production nominale annuelle de dihydrogène, ainsi que les coûts de capital, de maintenance et les coûts opérationnels de l'électrolyseur et du stockage en fonction de la demande quotidienne, ces données ont été trouvées dans l'article de Gökçek Kale [3].

17.3 Demande énergétique de certains composants

Pour déterminer le coût annuel de l'électricité dans la station, nous calculons de manière distincte les coûts des différents équipements dont la station a besoin.

17.3.1 Compresseur

Le compresseur est utile dans tous les cas de figure, que l'hydrogène soit produit sur place ou non. Dans ces deux perspectives, il est nécessaire de stocker l'hydrogène sous forme gazeuse compressée pour permettre aux automobilistes de faire le plein. Pour modéliser le coût de la compression de l'hydrogène, on suppose que cette dernière se fait en deux étapes, de la même façon que décrite dans [1]. Tout d'abord une première compression qui permet de passer de P_1 à P_2 , une valeur intermédiaire. L'hydrogène est ensuite abaissé à la température T et une deuxième compression l'amène à une pression P_3 . Ce processus est celui décrit dans l'étude (Nistor et al., 2016). Le travail nécessaire pour une telle compression est calculé (pour une mole de H_2) avec la formule suivante :

$$W = \frac{nRT}{n-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (28)$$

Avec n l'indice polytropique du gaz en question et $P_2 = \sqrt{P_1 P_3}$ pour des conditions optimales. Nous supposons d'autre part que le gaz est stocké à 350 bar ou 700 bar en fonction des besoins (350 pour les camions et 700 pour les voitures).

17.3.2 Refroidisseur

Pour le refroidisseur, nous tirons le coût énergétique en fonction de la température de départ et d'arrivée de l'étude [1] également. Dans les deux cas envisagés, la température de départ est de 15°C.

La température d'arrivée dépend des distributeurs de la station, pour le modèle que nous avons retenu, le

température d'arrivée est de -20°C, ce qui correspond à un coût énergétique de 0.18 kWh/kgH₂ (on aurait un coût de 0.33 kWh/kgH₂ pour un refroidissement à -40°C).

17.4 Analyse économique

Nous avons utilisé un outil simple qui permet de transformer l'investissement initial en un coût constant à payer tous les ans pendant une durée N . Le CRF (*Capital Recovery factor*) correspond à cette somme :

$$CRF = \frac{i(i+1)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (29)$$

où i est le taux d'actualisation réel. On calcule i à l'aide du r et $infl$, respectivement le taux interne de retour sur investissement et taux annuel d'inflation.

$$i = r + infl(1+r) \quad (30)$$

On calcule le coût annuel de la station en prenant en compte le remboursement des investissements initiaux (CRF), les coûts d'opération et de maintenance de l'équipement de la station, ainsi que les taxes (tax) et l'assurance (ins).

Dans le cas de notre étude, nous avons pris N égal à 10 et r égal à 8%.

Pour le prix d'achat de l'électricité, nous avons utilisé des valeurs de Eurostat qui donnent le prix moyen d'achat de l'électricité hors TVA en France en 2019 pour des professionnels en fonction de leur consommation annuelle en électricité. Il s'agit de paliers de prix et nous avons pris pour les consommations annuelles inférieures à 20 MWh la valeur la plus haute c'est-à-dire 0.16303 €/kWh, et pour les consommations annuelles supérieures à 150 MWh, la valeur la plus basse 0.04938 €/kWh.

17.5 Lieu de production de H₂

17.5.1 Production centralisée

Nous avons modélisé le coût de construction de la station par une loi de puissance grâce à des valeurs qui dépendent de la demande journalière en kg d'hydrogène, et nous y avons ajouté des valeurs de coût fixes au delà et en deçà d'une certaine valeur.

Nous avons utilisé pour le prix d'achat de l'hydrogène les prix de vente moyen en 2019 de l'hydrogène dans le monde entier en fonction de la quantité annuelle achetée, tous modes de production de l'hydrogène confondus. Il y a donc principalement de l'hydrogène produit à partir de reformage de gaz naturel ou de gazéification du charbon. Quand la demande en hydrogène sur la station augmente, le coût de l'achat de l'hydrogène doit augmenter ; les paliers de prix ne permettant de traduire cette augmentation du coût, nous avons modélisé le prix de l'hydrogène au kg par une loi de puissance à l'aide des bornes de ces paliers.

Pour le transport de l'hydrogène, nous avons calculé le coût de transport dans trois cas : via un gazoduc à une pression de 100 bars, par camionnage à l'état gazeux à une pression de 200 bars et par camionnage à l'état liquide à une pression de 8 bars.

Nous supposons acheter un camion à Diesel ou faire construire un gazoduc selon les cas, sachant que nous prenons en compte le coût de la rémunération du chauffeur et des frais du camion. Nous avons calculé le coût total de ces trois modes d'acheminement distincts en prenant également en compte le coût de la compression et pris le minimum.

17.5.2 Production sur place

On a modélisé la chaîne de production sur place du dihydrogène en prenant en compte les coûts des différents éléments, à savoir leur prix de capital et leur coûts d'opération et de maintenance (dans le cas de l'électrolyseur on a pris en compte notamment le coût de l'électricité et de l'eau selon les informations données dans l'étude de Stamatakis et *al.* [6]) : électrolyseur (de la gamme McLyzer de la marque McPhy tels que détaillés dans [7]) dont on choisit le modèle en fonction de la demande journalière, compresseur, bonnes de stockage normalisées (à 700 ou 200 bars), refroidisseurs, distributeurs selon les informations de [5]. En outre les données de [4] nous ont permis de vérifier nos ordres de grandeur.

17.5.3 Production sur place avec ajout d'une éolienne

L'ajout d'une éolienne (ou de plusieurs) est une question légitime, cela permettrait d'offrir une sorte d'autosuffisance à la station qui aurait la possibilité de vendre l'électricité produite par l'éolienne mais pas utilisée, et qui assurerait également un minimum d'émission de gaz à effet de serre dans un pays où l'électricité n'est pas aussi décarbonnée qu'en France.

Nous nous réservons ainsi dans un second temps le droit d'ajouter une éolienne à la station qui contient un électrolyseur, dans le but d'augmenter la partie renouvelable de l'énergie qui sert à produire le dihydrogène mais également, lorsque c'est possible, revendre l'énergie produite par l'éolienne qui ne nous servirait pas.

La puissance fournie par l'éolienne évolue selon quatre régimes de fonctionnement, telle celle décrite dans [1] :

$$P = \begin{cases} 0 & v_{vent} < v_{min} \\ P_R \cdot \frac{v_{vent} - v_{min}}{v_R - v_{min}} & v_{min} \leq v_{vent} < v_R \\ P_R & v_{vent} \leq v_{max} \\ 0 & v_{max} < v_{vent} \end{cases} \quad (31)$$

Avec v_{min} qui correspond à la vitesse minimale que le vent doit avoir pour mettre l'éolienne en marche, v_{max} la vitesse du vent au-delà de laquelle

l'éolienne ne fournit plus de puissance, P_R la puissance nominale fournie par l'éolienne dans son régime de fonctionnement optimal et v_R la vitesse nominale de l'éolienne. Pour l'étude, nous avons choisi l'éolienne E-53 Enercon pour lesquelles les valeurs de ces constantes sont obtenues à l'aide de la fiche technique [8] :

$$\begin{cases} v_{min} = 2.5 \text{ m/s} \\ v_{max} = 34 \text{ m/s} \\ P_R = 800 \text{ kW} \\ v_R = 12 \text{ m/s} \end{cases} \quad (32)$$

Pour rester à l'échelle de la journée dans nos calculs, on utilise une "journée type" de vent, heure par heure, déterminée en faisant la moyenne des vitesses du vent à proximité de la ville de Lyon sur deux semaines. Le choix de Lyon s'explique par la proximité de quelques stations à hydrogène et de projets de telles stations à proximité de la ville. Le résultat ainsi obtenu est comparé à une représentation, elle aussi heure par heure, de la demande quotidienne en hydrogène. Cette description de la demande est obtenue en modélisant la demande sur les 24 heures de la journée par une loi normale de moyenne 16 (heure de pointe avec la plus grosse demande) et d'écart-type 4. Nous comparons alors heure par heure la quantité d'énergie nécessaire et la quantité d'énergie fournie par l'éolienne.

Le total de la revente de l'énergie produite par l'éolienne qui n'est pas directement utilisée par la station se calcule assez facilement, en supposant que l'électricité produite est forcément rachetée et en imposant un montant de revente fixe de 0.083 €/kWh.

Nous considérons que le coût du convertisseur est inclus dans celui de l'éolienne. Le montant total sur l'année est alors déduit aux autres coûts (capital, maintenance, opération) propres à la station.

18 Résultats et analyses

18.1 Prix global

Nous avons dans un premier temps modélisé les coûts d'un électrolyseur McLyzer de l'entreprise McPhy. Cela inclut les coûts de capital, d'opération et de maintenance. On présente dans le graphe qui suit l'évolution du prix du kilogramme de dihydrogène à la pompe en fonction du nombre d'heures d'utilisation annuel pour différents modèles d'un électrolyseur McLyzer.

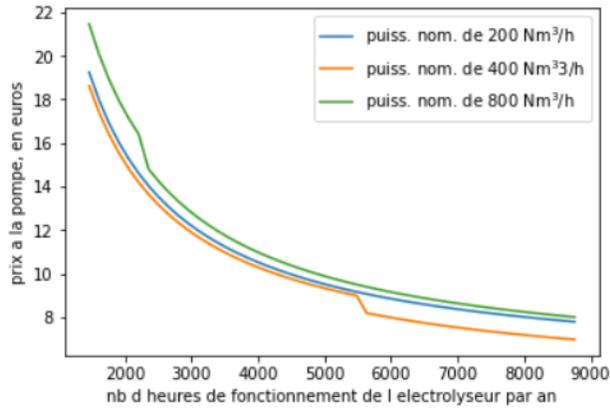


FIGURE 5 – Evolution du prix de l'hydrogène selon l'utilisation de l'électrolyseur

Nous voyons Fig. 5 que la tendance globale est une diminution du prix à la pompe pour un nombre d'heures élevé d'utilisation de l'électrolyseur. Ce nombre dépend de la demande journalière et donc du nombre de voitures et de camions qui affluent quotidiennement dans la station.

Nous remarquons par ailleurs que la fameuse valeur de 6.50€/kg à atteindre pour assurer la compétitivité face aux énergies fossiles actuelles ne semble être atteinte que par l'électrolyseur de puissance nominale 400 Nm³/h, au bout de près de 7150h de fonctionnement. Pour les deux autres types d'électrolyseurs considérés, on reste au-dessus de 8€/kg même au bout de 8500h de fonctionnement.

Par la suite, nous obtenons le graphique Fig. 6 présentant le prix du kilogramme de dihydrogène à la pompe en euros des différents modes de production de l'hydrogène en fonction du nombre de quotidien de voitures, en supposant par ailleurs que seulement 2 camions passent à la station en une journée. Les trois modes de production sont :

- Importation de celui-ci depuis une usine située à 100km de la pompe
- Production sur place avec électrolyseur McLyzer
- Production sur place avec électrolyseur McLyzer avec une éolienne à Lyon

On notera par ailleurs que l'allure est la même en modifiant le nombre de camions, on ne considère donc plus que des modifications du nombre de voitures.

Comme les courbes précédentes sur les électrolyseurs laissent pressentir, l'importation devient l'option qui donne le H₂ le moins cher au delà d'une certaine demande quotidienne.

Lorsque le H₂ est produit sur place, les trois discontinuités qui augmentent brusquement le prix (à 25, 78 et 180 voitures pour le premier graphique) sont dues à un changement d'électrolyseur, ce qui engendre des augmentations importantes de CAPEX. La première discontinuité aux alentours de 12 voitures dans le cas de la production sur place avec une éolienne est elle due à un changement de tarif pour l'électricité, dont le prix global diminue lorsque la consomma-

tion augmente, on n'observe pas de telle discontinuité dans le scénario sans éolienne car on est directement dans la tranche de prix la plus basse pour l'électricité. Ajoutons en outre que la présence d'une éolienne ne modifie presque plus le prix du H₂ dès qu'on dépasse 12 voitures, cela s'explique par la faible part que représente l'énergie fournie par l'éolienne dans l'énergie totale dont la station a besoin.

Pour le H₂ importé, la discontinuité est due à une modification du calcul du prix global de la station, lorsque l'on atteint la valeur haute.

On remarque qu'au delà de 78 voitures, le prix du kilogramme de H₂ dans le scénario d'importation devient inférieur à celui de la production sur place.

La valeur de 6.50€/kgH₂ n'est pas atteinte lorsque le H₂ est produit sur place, le minimum atteint étant de 6.82€/kgH₂. Elle est cependant bien atteinte lorsque le H₂ est importé, au delà de 104 voitures par jour (toujours dans l'hypothèse de 2 camions), on a bien un prix inférieur au prix compétitif.

A titre indicatif on donne les prix pour 10 et 200 voitures :

- Pour 10 voitures et 2 camions : 12.8 €/kg (cas import), 8.71 (cas électrolyse), 9.58 (cas électrolyse avec éolienne).
- Pour 200 voitures et 2 camions : 4.68 €/kg (cas import), 8.17 (cas électrolyse), 8.16 (cas électrolyse avec éolienne).

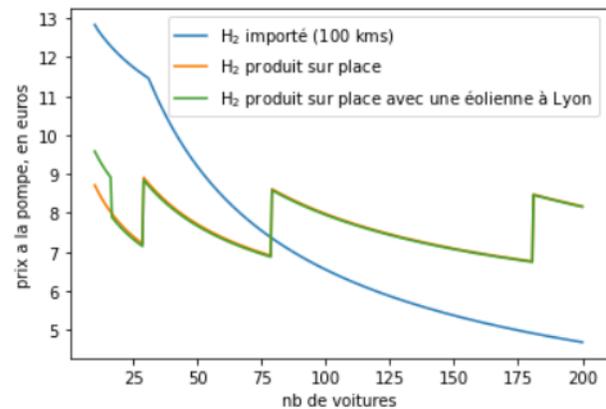


FIGURE 6 – Evolution du prix de l'hydrogène à la pompe en fonction de la demande (hypothèse 2 camions par jour)

L'étude du prix à la pompe en fonction de la distance entre la station et le lieu de production du H₂ nous a permis de conclure que, à demande fixe, l'évolution du prix est linéaire avec la distance à parcourir. Une modification de la distance entre l'unité de production et la station se traduirait donc sur le graphique précédent par une translation de la courbe vers le haut ou le bas.

Cependant, les variations relatives du prix d'importation restent minimales jusqu'à 900km (variation de 20 centimes pour une variation de 860km), ce qui représente à peu près la distance maximale entre une

station et un site de production en France, on considèrera le prix d'importation constant en fonction de la distance.

Le graphique Fig. 7 représente l'évolution du ROI en faisant varier la demande quotidienne en hydrogène (reliée au nombre de voitures moyen par jour). Le ROI est le taux de retour sur investissement.

$$ROI = r = \frac{\text{gain} - \text{coût}}{\text{investissement}} \quad (33)$$

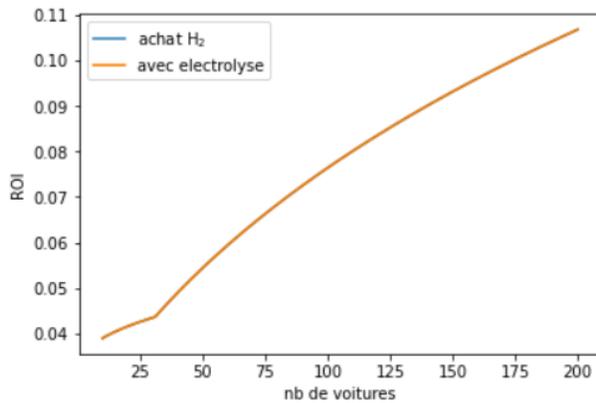


FIGURE 7 – Evolution du ROI en fonction de la demande

En ajoutant 0.5€ par kg d'hydrogène sur le prix d'achat de l'hydrogène à la station par le consommateur, on obtient le tracé suivant. On voit que plus la demande est forte, plus les investissements sont rentabilisés, et qu'il faut plus de 100 voitures en moyenne par jour pour atteindre le taux de retour sur investissement de 8% que l'on a pris pour nos calculs. Ce qui correspond à une très grosse station, et ce qui est très loin des stations à hydrogène actuelles en France.

Cela conditionne finalement le choix d'un électrolyseur pour une production d'hydrogène sur place.

18.2 Pertinence de l'éolienne

Le taux d'autoconsommation de l'énergie fournie par l'éolienne, c'est-à-dire le pourcentage d'énergie produite par l'éolienne qui est utilisée dans la station, pour alimenter les différentes installations, est, pour un nombre de voitures supérieur à 25, toujours au-dessus de 99% et tend vers 100%, ce qui signifie que la quasi totalité de l'énergie de l'éolienne est utile dans le fonctionnement de la station. Il faut alors voir dans un second temps si cela représente une part importante des besoins généraux de la station.

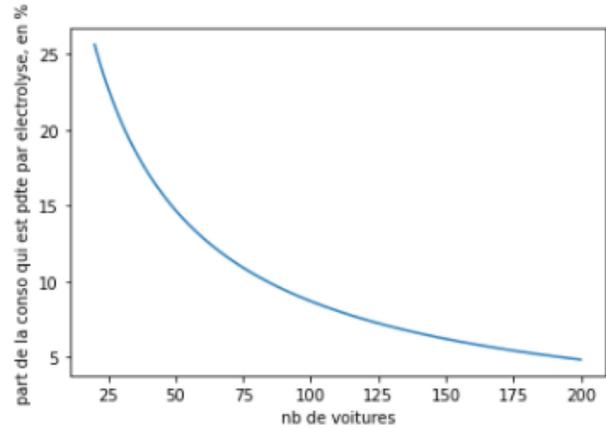


FIGURE 8 – Autoproduction en fonction de la demande quotidienne

Il apparaît donc sur le graphe Fig. 8 que l'éolienne s'avère très utile pour une station de petite taille (<25 voitures) puisqu'elle fournit plus de 25% de l'énergie consommée. En revanche, cette part chute très vite et passe en-dessous de 10% pour 83 voitures. Sachant que la quasi totalité de l'énergie fournie par l'éolienne est utilisée dans tous les cas de figure, l'installation d'une éolienne n'est rapidement plus une option viable pour la station. Aussi, l'installation sur une station de petite taille augmente le prix du H₂ par rapport au scénario sans éolienne de presque 0.80€/kg, ce qui représente près de 10% du prix et n'est donc pas négligeable.

19 Conclusion

La modélisation des coûts de fonctionnement et d'investissement de la chaîne de production sur place ou d'importation du dihydrogène semblent nous indiquer deux régimes de fonctionnement :

- Pour les petites stations, une production sur place du H₂ avec des prix plus intéressants que pour l'importation qui varient entre 10€ et 6.90€ au kilo, valable pour une demande quotidienne en H₂ inférieure à 381 kg.

- Pour les stations plus conséquentes, une production extérieure à la station avec importation, ce qui donne un prix de base de 7.30€/kg et qui diminue avec la demande quotidienne, passant en-dessous de la valeur-but de 6.50€/kg dès que la demande quotidienne dépasse 480 kgH₂.

En cas d'importation, a été calculé en se basant sur le prix actuel de l'hydrogène, c'est-à-dire celui fait avec un bilan carbone globalement mauvais. En ajoutant à ça les émissions des camions qui effectuent le transport du H₂ jusqu'à la station, on s'éloigne de façon conséquente de la motivation initiale du sujet : réduire les émissions de GES. Malgré une perte de compétitivité vis-à-vis des énergies fossiles, il paraît donc souhaitable que toute station hydrogène fonctionne avec une production sur place, même si cela signifie avoir un prix variable entre 10€ et 6.81€ le kilo de H₂.

Bibliographie

Akpolat, A. N., Yang, Y., Blaabjerg, F., Dursun, E., Kuzucuoğlu, A. E. (2020). Li-ion-based Battery Pack Designing and Sizing for Electric Vehicles under Different Road Conditions. 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 1 6. Consulté le 27 novembre à l'adresse : <https://doi.org/10.1109/SEST48500.2020.9203196>

Babin, A., Rizoug, N., Mesbahi, T., Boscher, D., Hamdoun, Z., Larouci, C. (2018). Total Cost of Ownership Improvement of Commercial Electric Vehicles Using Battery Sizing and Intelligent Charge Method. IEEE Transactions on Industry Applications, 54(2), 1691-1700. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2784351>

Benitez, A., Wulf, C., de Palmenaer, A., Lengersdorf, M., Röding, T., Grube, T., Robinius, M., Stolten, D., Kuckshinrichs, W. (2021). Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank. Journal of Cleaner Production, 278, 123277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123277>

Bernier, J.C.(2020). L'hydrogène au secours de l'économie européenne. Disponible sur <https://www.mediachimie.org/actualite/1%E2%80%99hydrog%C3%A8ne-au-secours-de-l%E2%80%99%C3%A9conomie-europ%C3%A9enne>.

Bonus et malus écologiques en 2020. (s. d.). Agir pour la transition écologique | ADEME. Consulté 5 janvier 2021, à l'adresse <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/finances/aides-deplacements/bonus-malus-ecologiques-2020>

Chauvin, A., Hijazi, A., Sari, A., Bideaux, E. (2015). Impact of Supercapacitor Ageing Model on Optimal Sizing and Control of a HEV using Combinatorial Optimization. IFAC-PapersOnLine, 48(15), 403-410. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.058>

Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D. P., Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. Applied Energy, 269, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>

CGDD. La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements, Données et études statistiques 2008. 2010. La Revue (SOeS), consulté le 23 novembre à l'adresse : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-des-francais-panorama-issu-de-lenquete-nationale-transports-et-deplacements-2008>.

Conseil international des grands réseaux électriques. Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. CIGRÉ, 2014. Consulté le 20 novembre à l'adresse : https://e-cigre.org/publication/ELT_273_8-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-energy-resources

David, M., Ocampo-Martínez, C., Sánchez-Peña, R. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers : A review. Journal of Energy Storage, 23, 392-403. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>

Focus sur les mesures pour le déploiement des véhicules moins polluants (s. d.). Consulté 2 décembre 2020, à l'adresse https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20201011_DP_CCC_V16_compressed_compressed.pdf

Gaikwad, S. D., Ghosh, P. C. (2020). Sizing of a fuel cell electric vehicle : A pinch analysis-based approach. International Journal of Hydrogen Energy, 45(15), 8985-8993. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.116>

Girard, R.(2020). Evaluer le coût économique de la production d'électricité. Disponible sur <https://www.energy-alternatives.eu/2020/08/20/decomposition-lcoe.html>

Girard, R.(2020). Mix de production d'électricité-énergie et puissance. Disponible sur <https://www.energy->

alternatives.eu/2020/05/07/mix-de-production-deelectricite-energie-et-puissance

Global EV Outlook 2020 – Analysis—IEA. (s. d.). Consulté 28 novembre 2020, à l'adresse <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>

Gökçek, M., Kale, C. (2018). Optimal design of a Hydrogen Refuelling Station (HRFS) powered by Hybrid Power System. *Energy Conversion and Management*, 161, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.007>

Grille prix Tarif Bleu (s. d.). Consulté 30 novembre 2020, à l'adresse https://particulier.edf.fr/content/dam/2-Actifs/Documents/Offres/Grille_prix_Tarif_Bleu.pdf?fbclid=IwAR3BxNgIuuTYmxNiPZgExnBxREY9N2kzFr13bghi4cwoD19jDvu4FRfVBng

Kurland, S. D. (2019). Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production. *Environmental Research Communications*, 2(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab5e1e>

L2C2. (s. d.). Maintenance et entretien du véhicule électrique. Avere-France. Consulté 7 janvier 2021, à l'adresse http://www.avery-france.org/Site/Article/?article_id=5888

Les émissions de CO2 par kWh produit en France. (s. d.). Consulté 23 novembre 2020, à l'adresse <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-emissions-de-co2-par-kwh-produit-en-france>

Letourneau, C. (s. d.). Ministère de l'écologie., 161. Nistor, S., Dave, S., Fan, Z., Sooriyabandara, M. (2016). Technical and economic analysis of hydrogen refuelling. *Applied Energy*, 167, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.094>

Ligen, Y., Vrabel, H., Girault, H. H. (2018). Mobility from renewable electricity : Infrastructure comparison for battery and hydrogen fuel cell vehicles. *World Electr. Veh. J.* 9(1), 3. <https://doi.org/10.3390/wevj9010003>.

Masih-Tehrani, M., Ha'iri-Yazdi, M.-R., Esfahanian, V., Safaei, A. (2013). Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement. *Journal of Power Sources*, 244, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.154>

McLyzer Portfolio (s. d.). Consulté 7 janvier 2021, à l'adresse https://cellar-c2.services.clever-cloud.com/com-mcphy/uploads/2020/08/20.05.McPhy_Portfolio_ELY_McLyzer_FR.pdf?fbclid=IwAR373Lc84roVRxkbbB1Fpww-h9cETICUVuxBgfFIxiBeJm6wRr24q41s4Qiw

Quel est le prix de la recharge pour une voiture électrique ? (2019, février 28). Beev - Votre voiture électrique en quelques clics. <https://beev.co/recharge/prix-recharge-voiture-electrique/> The Future of Hydrogen – Analysis. (s. d.). IEA. Consulté 21 novembre 2020, à l'adresse <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

RTE. Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique. 2019. Consulté le 20 novembre 2020 à l'adresse : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/electromobilee%20synthese.pdf>.

RTE.(2019). Schéma décennal de développement du réseau. Disponible sur https://assets.rtefrance.com/prod/202007/Sch%C3%A9ma%20d%C3%A9cennal%20de%20d%C3%A9veloppement%20de%20r%C3%A9seau%202019%20-%20Rapport%20complet_1.zip

Stamatakis, E., Zoulias, E., Tzamalidis, G., Massina, Z., Analytis, V., Christodoulou, C., Stubos, A. (2018). Metal hydride hydrogen compressors : Current developments early markets. *Renewable Energy*, 127, 850-862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.073>

Zhang, J., Wang, Z., Liu, P., Zhang, Z. (2020). Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data. *Applied Energy*, 275, 115408. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115408>

Zheng, J., Zhao, L., Ou, K., Guo, J., Xu, P., Zhao, Y., Zhang, L. (2014). Queuing-based approach for optimal dispenser allocation to hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), 8055-8062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.112>

Annexe

prix d'achat	< 45 000€	entre 45 000€ et 60 000€	> 60 000€
Voiture 100% électrique	27% du prix avec un plafond à 7 000€ (6 000€ à partir du 01/01/2021)	3 000€	<i>pas de valeur</i>
Voiture à hydrogène	<i>pas de valeur</i>	<i>pas de valeur</i>	3000€

TABLE 4 – Montant du bonus écologique à l'achat. (Bonus et malus écologiques en 2020, s. d.)

Pour les voitures hybrides rechargeables au prix d'achat inférieur à 50 000€ ayant une autonomie électrique d'au moins 50 km et une émission WLTP entre 21 gCO₂/km et 50 gCO₂/km, le montant du bonus écologique est de 2 000€.

Émissions (en gCO ₂ /km)	Malus (en €)
≤ 109	0
110	50
...	...
125	400
...	...
140	1 901
...	...
172	12 012
≥ 173	12 500

TABLE 5 – Montant du malus lié à l'acquisition d'un véhicule d'occasion. (Bonus et malus écologiques en 2020, s. d.)

Nombre de chevaux fiscaux	Taxe (en €)
≤ 9	0
10-11	100
12-14	300
> 14	1 000

TABLE 6 – Montant de malus lié à l'acquisition d'un véhicule d'occasion. (Bonus et malus écologiques en 2020, s. d.)

Motorisation	Coût d'entretien (en €/an)
Essence	536-913
Diesel	536-918
Hybride	482-826
Électrique	413-706
Hydrogène	413-706

TABLE 7 – Coût de l'entretien.

Ces prix ont été calculés en considérant les fréquences de remplacement et le coût de chaque pièce importante dans le type de véhicule associé.

	Ni (en g)	Mn (en g)	Co (en g)	Li (en g)	graphite (en g)	F (en g)	Cu (en g)	Al (en g)
NMC 622	366	333	357	127	925	55-130	600-2700	400
NMC 622	578	180	193	114				
NMC 811	652	76	82	96				
NMC 90/5/5	698	36	39	92				

TABLE 8 – Composition d’une batterie usuelle de 1 kWh. (Adapté de (CEA, 2019))

L’IEA présente les chiffres suivants pour 2019 (Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA, s. d.) : pour les 2.1 millions de véhicules électriques vendus, il a fallu 19 kt de Cobalt, 17 kt de Lithium, 22 kt de Manganèse, 65 kt de Nickel. En ramenant ceci à une voiture, on trouve en moyenne 9 kg de Cobalt, 8 kg de Lithium, 10.5 kg de Manganèse, 31 kg de Nickel. En prenant l’évolution du parc automobile électrique, il faudrait en 2030 une quantité de matériaux de :

- Stated Policies Scenario : 180 kt de cobalt, 185 kt de lithium, 177 kt de manganèse et 925 kt de nickel.
- Sustainable Development Scenario : compter au moins deux fois plus que le scénario précédent.

De même il faudrait comptabiliser plusieurs dizaines de kilo de cuivre pour la connectique et l’électrification. Aussi, afin de compenser le surpoids du véhicule, il est nécessaire d’alléger la structure en utilisant un alliage d’aluminium, soit au bas mot 40% de plus d’aluminium que pour un moteur thermique.

<i>attributs</i> \ <i>type</i>	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Masse(kg)	1288	1330	1538	1532	1747
Consommation sur 100km	6.1L	3.1L	2.4L - 6.5kWh	21.6kWh	1.3kgH ₂
Capacité	—	—	33kWh	50kWh	3kgH ₂

TABLE 9 – Caractéristiques des véhicules.

Modèle de voiture	Zoé (Achat batterie compris)	208
Durée de vie	150000 km	150000 km
Achat (€)	32300	19400
Bonus écologique (€)	-7000	0
Prime conversion (€)	-2000	0
Malus carte grise (€)	350	350
Malus carbone (€)	0	330
Coût de l’énergie (€)	5295	13000
Entretien (€)	8250	11785
Assurance (€)	7500	7500
Reprise (€)	-5000	-5000
TCO (€)	39695	47365
TCO (c€/100km)	26.43	31.58

TABLE 10 – Premiers calculs sur un exemple citoyen.

Usage	Km/an	Vitesse moyenne(km/h)	Rechargeable à la maison	Rechargeable en ville	Prix de l'énergie	Consommation	Prix/an (€)	Prix/km	Commentaires
Citadin : électrique	< 6000	Entre 16 et 40	Non	Oui (abonnement/bornes)	0,25€/kWh	20 kWh/100km	300	0,05	Petites batteries suffisantes
Citadin : essence	< 6000	Entre 16 et 40	Non	Oui (à la pompe)	1,35 €/L	12L/100km	972	0,16	Facteur 3 par rapport à l'électrique
Périurbain : électrique	18000	80-90	Oui	Oui	0,14 €/kWh	25 kWh/100km	700	0,04	Plus grosses batteries nécessaires
Périurbain: essence	18000	80-90	Non	Oui	1,35 €/L	8 L/100km	1944	0,11	Facteur 3 par rapport à l'électrique
Rural : électrique	> 18000	90-100	Pas toujours	Pas toujours	Maison : 0,14€/kWh Autoroute : 0,5€/ kWh	10 kWh/100km	> 684	0,04	Ces batteries coûtent plus cher donc le coût peut ne pas être amorti
Rural : essence	> 18000	90-100	Non	Oui	1,35 €/L	6L/100km	> 1458	0,08	La différence avec l'électrique est moins notable

FIGURE 9 – Tableau récapitulatif des différentes contraintes.

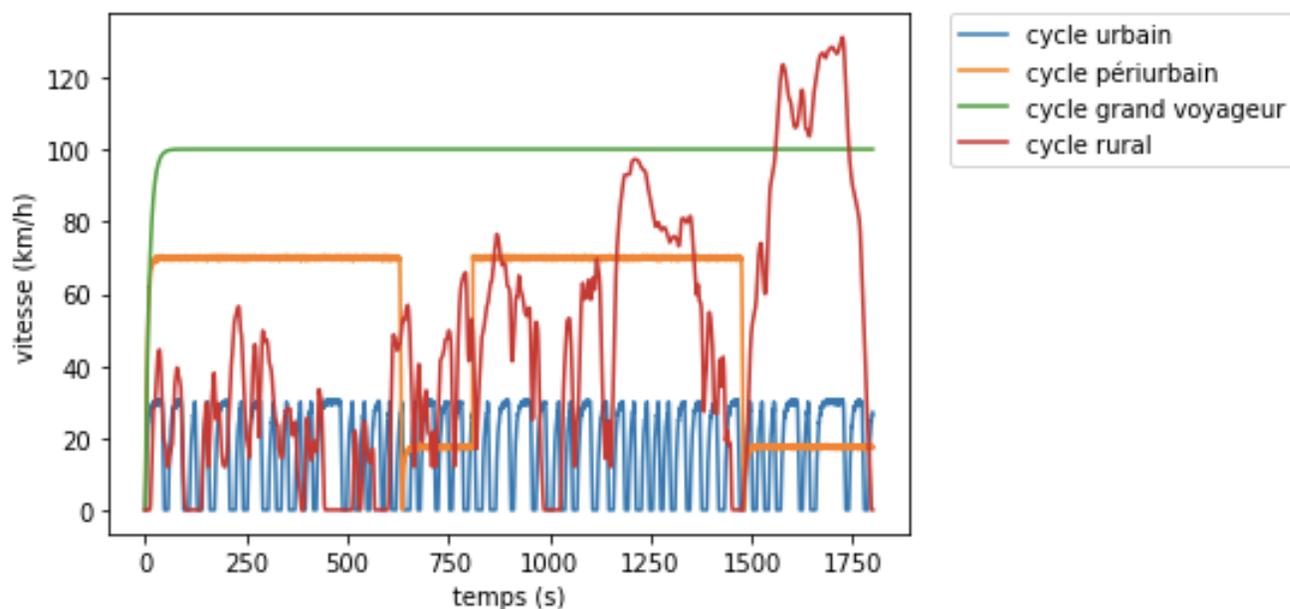


FIGURE 10 – Différents cycles de vitesse.

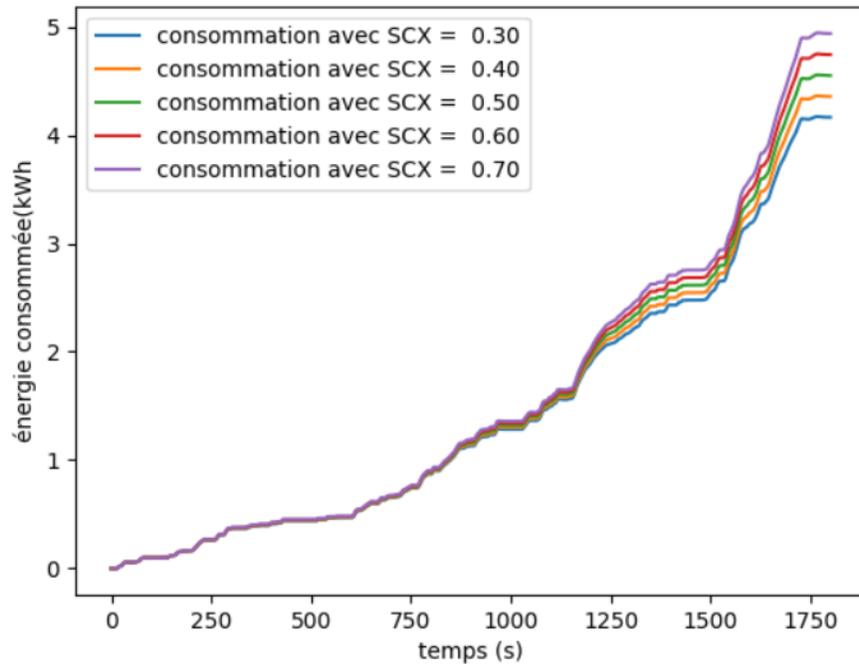


FIGURE 11 – Consommation énergétique pour différentes valeurs SCx (cycle WLTP).

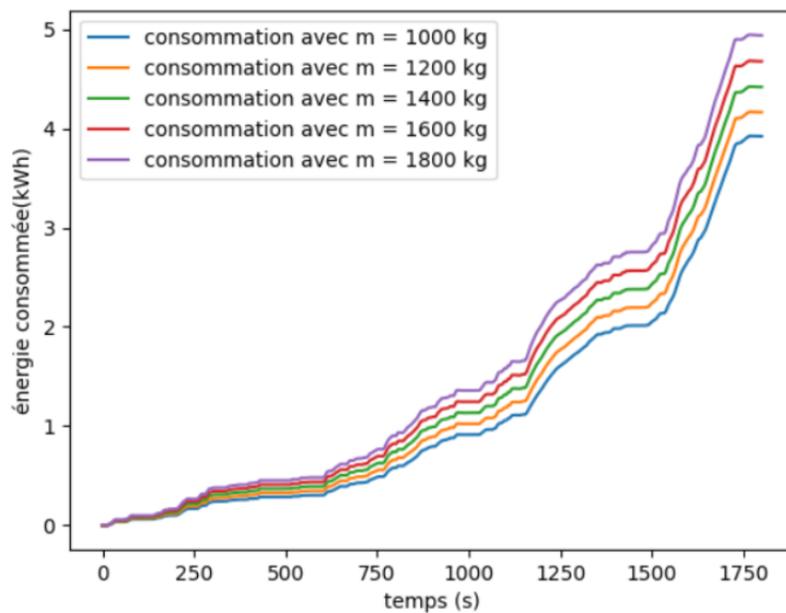


FIGURE 12 – Consommation énergétique pour différentes masses (cycle WLTP).

Avec ces deux graphes montrant la consommation des véhicules, on voit alors l'impact majeur de la masse sur la consommation quelque soit sa vitesse et aussi l'impact du coefficient SCx que l'on peut observer seulement à haute vitesse (où la force aérodynamique est prédominante). La masse est donc un facteur important qui doit être minimisé pour réduire la consommation des véhicules.

Consommation en Hydrogène et électricité des différents véhicules

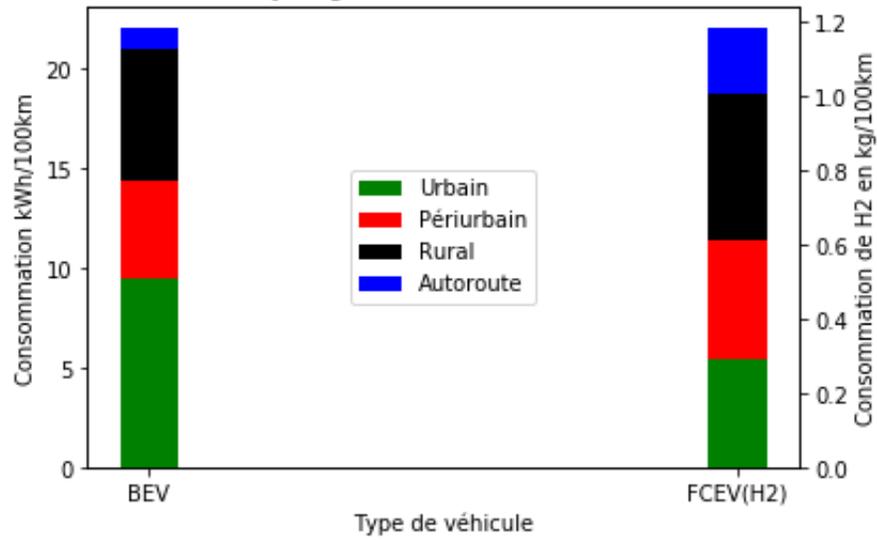


FIGURE 13 – Consommation énergétique pour un véhicule électrique de masse 1700kg.

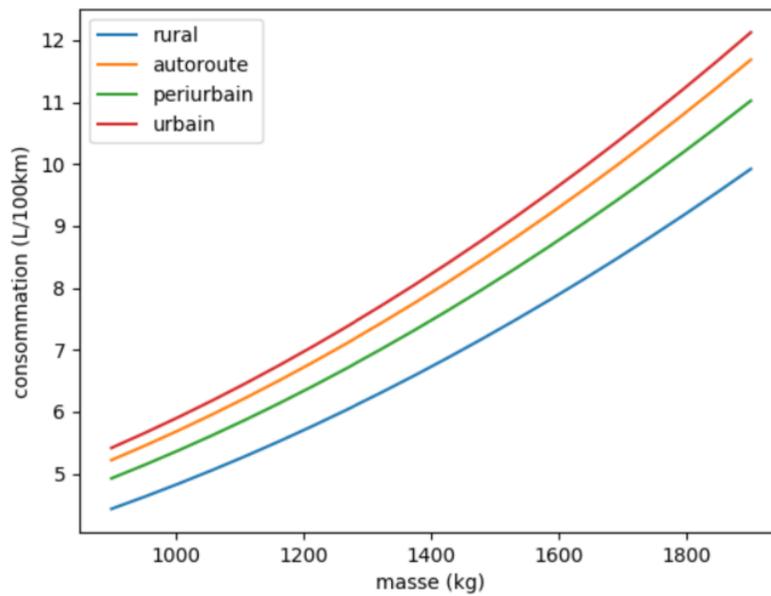


FIGURE 14 – Consommation énergétique des voitures à essence en fonction de leur masse.

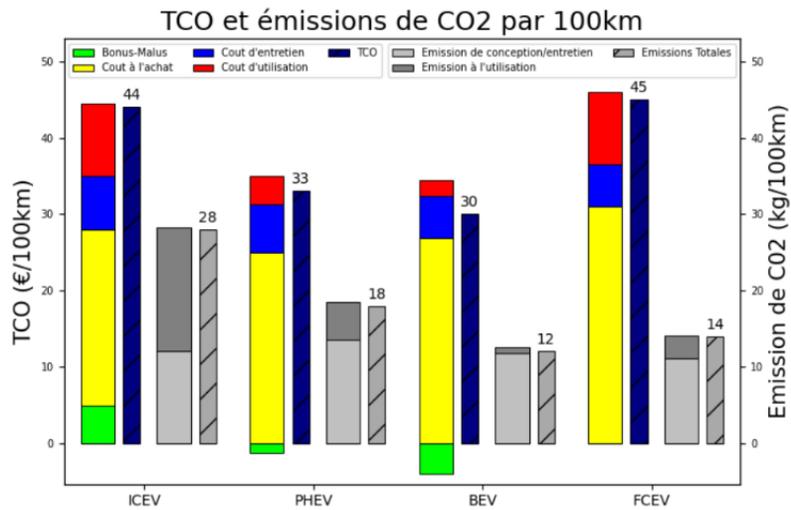


FIGURE 15 – TCO et émissions CO_{2eq}/100km pour une berline pour un cycle périurbain en France.

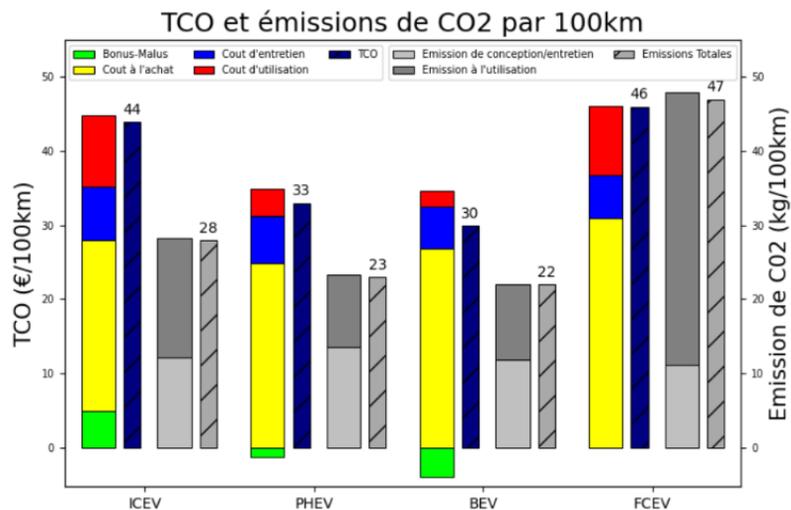


FIGURE 16 – TCO et émissions CO_{2eq}/100km pour une berline pour un cycle périurbain en Chine.

INFORMATIONS PRATIQUES SUR OUTIL CALCUL DE COÛT ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN VÉHICULE :

Informations pratiques et complémentaires sur le coût de possession :

Complément 1.1 - Evaluation du prix de l'électricité à la recharge pour le profil rural :

Dans ce cas de figure, on considère que l'utilisateur est contraint, dans un cadre professionnel par exemple, de recharger sur l'autoroute. Dans deux tiers des cas, le plein se fait sur l'autoroute pour un tarif de 0,5€/kWh, dans un tiers des cas à la maison, pour un tarif de 0,14€/kWh. En moyenne, le plein revient donc à un tarif de 0,38€/kWh.

Complément 1.2 - Variabilité de l'usure selon le véhicule :

Les voitures électriques sont globalement moins chères que les thermiques car certaines pièces comme la boîte de vitesse ne sont pas présentes et que d'autres pièces comme les freins sont moins utilisées grâce au système de régénération d'énergie qui participe au frein moteur.

Les voitures hybrides nécessitent un entretien de fréquence moins importante que les voitures thermiques du fait qu'elles utilisent alternativement ou de manière moins intensive les pièces propres au caractère thermique.

Complément 1.3 - Usure d'une batterie :

Les cellules de la batterie vont perdre en capacité au fil des cycles en fonction de la profondeur de décharge, du courant imposé lors de la charge, de la température d'utilisation (charge ou décharge). Cependant, notre étude ne se penche pas sur ces paramètres car le phénomène est lent et complexe à considérer dans le cadre de notre étude.

Informations pratiques et complémentaires sur le coût environnemental :

Complément 2.1 - Facteur d'émission de l'hydrogène :

On fait l'hypothèse que tout l'hydrogène utilisé est fait par électrolyse de l'eau (malgré la rareté du procédé et son coût important). En notant FE_{el} l'émission du mix électrique en kg/kWh_{el}, $C_{PEM} = 5$ kWh_{el}/Nm³H₂ le coût électrique de l'électrolyse PEM et $V_m = 11$ Nm³/kg le volume massique du dihydrogène, on a bien : $FE_{H_2} = FE_{el} * C_{PEM} * V_m = 55 * FE_{el}$

Nous avons considéré l'électrolyse PEM (*Proton Exchange Membrane*) qui est une des techniques les plus récentes. Nous voulions une valeur simple à utiliser et qui s'inscrivait aussi dans la technologie récente.

Informations pratiques et complémentaires sur les usages :

Complément 3.1 - Descriptif des différents usages :

1. Urbain

Considérons un habitant d'une métropole comme Lyon ou Marseille. Ses principaux trajets sont travail-maison ou travail-école, et ce dans un rayon de dix kilomètres maximum. Si ces trajets sont aisément réalisables par un véhicule à essence, que l'on remplit toutes les quinze semaines, les nouvelles législations prévoient d'interdire l'accès à la ville à ces véhicules. Alors, la transition vers la mobilité électrique constitue un véritable enjeu pour le citoyen.

2. Périurbain

Considérons un habitant d'une commune voisine, dont le travail est en plein cœur d'une métropole. La transition vers la mobilité électrique est nécessaire pour qu'il puisse rentrer dans la ville après des autoroutes ou nationales.

3. Rural

Considérons un habitant d'un village français. Il est capable d'emprunter des routes de campagne, des départementales, des autoroutes et parfois d'entrer dans les villes. Ce secteur est ancré dans la mobilité thermique et la transition pourra être difficile.

4. Grand voyageur

Considérons une personne qui, au cours de l'année, est amenée à sillonner les autoroutes de France. Un problème des véhicules électriques peut être l'impossibilité de la recharge domestique pendant une certaine distance.

Informations pratiques et complémentaires sur le dimensionnement :

Complément 4.1 - Hypothèses sur le conducteur :

Dans la structure de notre code et de notre étude, nous considérons que notre conducteur parcourt toujours une même distance (une moyenne), en suivant toujours le même cycle de conduite, définis précédemment. En outre, nous considérons qu'il conduit intelligemment, en cherchant à optimiser la consommation d'énergie, ce que les tableaux de bord de nos jours aident à réaliser.

Complément 4.2 - Dimensionnement des batteries dans les véhicules hybrides :

La batterie électrique n'est pas la source principale d'énergie puisque dans ces véhicules les machines thermiques restent imposantes. Toutefois, leur influence n'est pas à négliger. En effet, la batterie a deux rôles très importants puisqu'ils permettent de réduire jusqu'à 20% de la consommation énergétique de la voiture. Le premier est de stocker l'énergie récupérable lors des décélérations, on parle alors de freinage régénératif. En faisant fonctionner le moteur électrique en mode génératrice, il est alors possible de venir stocker sous forme électrique l'énergie dissipée lors du freinage, avec en bonus un freinage magnétique qui permet de diminuer l'utilisation et donc l'usure des plaquettes de frein. Malheureusement, la quantité récupérable a ses limites, car la génératrice atteint rapidement la quantité maximale d'énergie qu'elle peut convertir : d'après l'étude de Zang *et al* (Zhang et al., 2020), dès une décélération de $1.5m/s^2$ les limites sont atteintes. Il se montre vraiment utile sur des trajets avec des variations régulières de vitesse, et sera peu utile par exemple en descente en montagne où la génératrice lâchera prise ou sur des routes nationales où la vitesse reste relativement constante.

Le second rôle est de remplacer le moteur thermique lors des démarrages et petites vitesses, qui en ville représentent une part importante de la consommation d'énergie de la voiture. Grâce au mode *Stop-and-Start*, la voiture peut basculer automatiquement de la batterie à la machine thermique à partir d'un certain seuil, au bout de quelques secondes.

Il convient de distinguer les deux types d'hybride thermique/électrique, à savoir les rechargeables et les non-rechargeables.

Les batteries des hybrides non-rechargeables HEV ne peuvent donc se recharger que par freinage régénératif ou grâce au moteur thermique. Evidemment, il faut limiter au plus la recharge par combustion thermique, à cause des pertes et de la dégradation d'énergie.

A l'inverse, les batteries hybrides rechargeables PHEV peuvent par définition se brancher sur le réseau pour être rechargées. Cela devient intéressant car le prix de l'électricité est bien inférieur à celui de l'essence si l'on compare en €/km. Il faut en moyenne 6 litres d'essence à 1€30 le litre pour faire 100km, et 20 kWh d'électricité, à moins de 0.2€/kWh pour faire 100km. Soit 7,8€ pour l'essence contre 4€ (facteur2) pour l'électricité.

Cependant, il faut limiter la partie électrique qui est chère, le PHEV restant un véhicule thermique, et le moteur thermique pouvant prendre le relais à tout moment. Le dimensionnement idéal est d'avoir la capacité suffisante de batterie pour faire les trajets en journée en tout électrique, du moins dans les zones urbaines, étant donné que le moteur électrique reste petit et ne peut fonctionner sur de fortes puissances. La capacité à choisir pour les batteries dépend des consommateurs, et de la consommation électrique sur 100km, qui peut assez fortement varier selon le cycle de conduite et l'utilisation d'auxiliaires comme la climatisation ou le système qui sert à conserver la batterie entre 15 et 20°C, à son point de fonctionnement optimal.

La batterie serait alors rechargée durant la nuit.

Complément 4.3 - Surdimensionnement d'une batterie :

Surdimensionner une batterie permet d'obtenir une capacité réellement capable d'offrir l'autonomie souhaitée, mais en ajoutant des cellules en parallèle, on diminue également le courant qui passe dans celles-ci. Or des courants intenses dégradent les batteries. Il est ainsi possible de prolonger la vie de la batterie de 30 à 80%.

Complément 4.4 - Domaine optimal d'une batterie en fonction de la puissance de la pile à combustible :

En notant x la puissance de la pile à combustible, la capacité en Wh se définit comme ci-dessous :

$$Capa \in \begin{cases} TDR = 10 : si x < 38,5 : f(x) & sinon : 400 + (x - 38.5) * 225/11 \\ TDR = 5 : si x < 30 : f(x) & sinon : 870 + (x - 30) * 465/7 \\ TDR = 3.3 : si x < 23.5 : f(x) & sinon : 1200 + (x - 23.5) * 1400/13 \end{cases}$$

avec

$$f(x) = [1_{[10,13]} * [2200 - (x - 10) * 150] + 1_{]13,30]} * [1750 - (x - 13) * 880/17]] + 1_{]30,38.5]} * [870 - (x - 30) * 470/8.5]$$

Complément 4.5 - Précision sur l'autonomie pour les véhicules à hydrogène :

L'autonomie doit être bien choisie : en effet, les stations de recharge en hydrogène sont très rares, rendant ainsi les opportunités de recharge plus faibles. Il faut donc considérer au moins 300 km d'autonomie, voire plus selon les distances quotidiennes. C'est d'ailleurs l'un des avantages des FCEV. On peut facilement monter à 500km d'autonomie en augmentant la taille ou le nombre de réservoirs.

Programme utilisé dans la partie III

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import math
4  """
5  VARIABLES : E, d(t), Tr(t)
6
7  """
8
9
10 E=575      # demande énergétique des voitures sur 24h (en kWh) évaluée précédemment à
    ↪ partir d'une base de donnée
11
12
13 # DIFFERENTS SCENARII DE DEMANDE DE RECHARGE
14 # (t) = répartition des recharges de voiture sur la journée
15
16 """
17 def d(t):  #gaussienne centrée sur a, paramétrée par s
18     '''
19     d(t) est 24-périodique et l'intégrale de d(t) sur une période donne 1
20     '''
21     while t<0:
22         t+=24
23     while t>24:
24         t-=24
25     # insérer l'expression d(t) ici :
26     s=3
27     a=18
28     return math.exp(-pow(t-a,2)/(2*pow(s,2)))/(s*math.sqrt(2*math.pi)) +
    ↪ math.exp(-pow(t-a+24,2)/(2*pow(s,2)))/(s*math.sqrt(2*math.pi))
29
30 """
31
32 def d(t):  #répartition journée de travail
33     while t<0:
34         t+=24
35     while t>24:
36         t-=24
37     # insérer l'expression d(t) ici :
38     if t<6:
39         return 0.01
40     if t<12:
41         return 0.05
42     if t<16:
43         return 0.05-0.01*(t-12)
44     if t<19:
45         return 0.01+0.03*(t-16)
46
47     return 0.1-0.09*(t-19)/6
48     """

```

```

49 def d(t):      #gaussienne bimodale
50     '''
51     d(t) est 24-périodique et l'intégrale de d(t) sur une période donne 1
52     '''
53     while t<0:
54         t+=24
55     while t>24:
56         t-=24
57     # insérer l'expression d(t) ici :
58
59     alpha=0.5
60     s1=4
61     h1=8
62     s2=4
63     h2=23
64     resultat=0
65     for i in [-1,0,1]:
66         resultat+=
67             ↪ alpha*math.exp(-pow(t-24*i-h1,2)/(2*pow(s1,2)))/(s1*math.sqrt(2*math.pi)) +
68             ↪ (1-alpha)*math.exp(-pow(t-h2-24*i,2)/(2*pow(s2,2)))/(s2*math.sqrt(2*math.pi))
69     return resultat
70
71     '''
72     # DIFFERENTES STRATEGIES DE RECHARGE :
73     # Tr(t) = temps de recharge d'une voiture qui se branche à t
74     '''
75     def Tr(t): # temps recharge constante (en heure)
76         return 7
77     ''
78     def Tr(t): # recharge K fois plus lente quand il y a du monde
79         K=40
80         return 3+d(t)*K
81     ''
82     def Tr(t): # deux modes de recharge : rapide le jour, lent la nuit
83         while t<0:
84             t+=24
85         while t>24:
86             t-=24
87         if t<3 or t>22:
88             return 6
89         return 3
90     '''
91     def Tr(t): # deux modes de recharge :
92         while t<0:
93             t+=24
94         while t>24:
95             t-=24
96         if (t>5 and t<9):
97             return 9
98         return 7
99     ''
100    '''
101    Calcul de P(t) la puissance demandée sur le réseau avec avec les paramètres E et d(t) et
102    ↪ Tr(t)
103    '''
104    def inte(f,a,b,h): #methode rectangle au milieu
105        t=a

```

```

105     S=0
106     while t<b:
107         S+=f(t+h/2)*h
108         t+=h
109     return S
110
111 if abs(inte(d,0,24,0.1)-1)>0.1:
112     print("attention d(t) ne vérifie pas les hypothèses")
113     print(abs(inte(d,0,24,0.1)-1))
114
115 def n(ta,t): #les personnes arrivées à la date ta sont elles présentes à t?
116     if ta+Tr(ta)<t:
117         return 0
118     return d(ta)
119
120
121 def P(t):
122     """
123     on définit d'abord P0 puis on normalise. P0 est proportionnel au nombre de personnes
124     ↪ en charge
125     """
126     h=0.1
127
128     if t<0:
129         jour=int(t/24)-1
130     else:
131         jour=int(t/24)
132
133     def P0(t):
134         def nt(ta):#personnes présentes à t qui étaient arrivées à ta
135             return n(ta,t)
136         return inte(nt,(jour-1)*24,t,h)#personnes présentes à t
137     S=inte(P0,jour*24,(jour+1)*24,h)
138     return P0(t)*E/S
139
140 def tracer(a,b,N):
141     T=np.linspace(a,b,N)
142     Y1=[E*d(t) for t in T]
143     Y2=[P(t) for t in T]
144     TR=[Tr(t) for t in T]
145     plt.plot(T,Y1,"blue",label="début de recharge")
146     plt.plot(T,Y2,"red",label="puissance (en kW)")
147     plt.plot(T,TR,"green",label="durée de la recharge (1 = 1h)")
148     plt.legend()
149     plt.show()
150
151 def fabrikdemand():
152     EVs_demand=[]
153     for i in range(24):
154         EVs_demand.append(round(P(i)/(35),3))
155     return EVs_demand
156
157 tracer(0,48,70)
158 print(fabrikdemand())

```

Annexe de la partie IV

1. Element d'économie

ins = 0.015

$r = 0.08$
 $\text{infl} = 0.01$
 $N = 10$
 $\text{tax} = 0.01$

2. Autoconsommation

Définition : Pourcentage de l'énergie produite sur place consommée sur place. A ne pas confondre avec autoproduction.

3. Autoproduction

Définition : Pourcentage de l'énergie consommée totale originaire de la production sur place.

4. Electrolyseur

De type McLyzer (par McPhy) :

- CAPEX = 1500 €/kW (Optimal design of a Hydrogen Refuelling Station (HRFS))
- OPEX = 1% CAPEX (rapport 2019 IEA et notice McLyzer)

5. Stockage en général

$P_{cH_2} = 33,33$ kWh/kg (pouvoir calorifique du H_2)

Energie nécessaire pour stocker 1 kg de $H_2 = 12,5\%$ P_{cH_2} (d'après présentation de la filière H2 de Pedro Affonso Nobrega)

Consommation énergétique par m^3 de $H_2 = 4,5$ kWh/ m^3 (dans des conditions normales de pression et de température)

Stockage avec bonbonnes 700 bars :

Coût par kg de $H_2 = 700$ \$ /kg

Masse de H_2 stockée par bonbonne = 5 kg

Stockage avec bonbonnes 350 bars :

Coûts par kg de $H_2 = 86$ \$ /kg selon PanGas

Masse de H_2 stockée par bonbonne = 0.8 kg

6. Compresseur

Coût de capital estimé = 145 000 € (Metal hybride hydrogen compressors : Current developments early markets, 1)

Coût annuel opérationnel et de maintenance = 12 000 €/an

7. Refroidisseur

Coût unitaire = 5 000 \$

8. Distributeur

Coût unitaire = 54 000 \$

9. Eolienne

Coût de capital = 1 147 154€