



# Affinement des hypothèses de base concernant l'apport des progrès technologiques dans la décarbonation de la mobilité

## Note de synthèse

Étude réalisée par 6t-bureau de recherche et Territoires et Energies

pour le compte

du Canton de Genève et du Grand Genève



---

# Impressum

## Commanditaires



REPUBLIQUE  
ET CANTON  
DE GENEVE

FOI TENEREUS LUX

### État de Genève

Office cantonal des transports (OCT)  
Chemin des Oliquettes 4  
1213 Lancy

Service cantonal du développement durable  
Rue des Gazomètres  
1205 Genève



### Grand Genève

Direction du projet d'agglomération  
Rue David Dufour 5  
Case postale 22  
1211 Genève 8

## Mandataires

6t-bureau de recherche Sàrl  
Rue des Voisins 15  
1205 Genève

Territoires & Energies  
Soubeyran 7  
1203 Genève

## Auteurs

Sébastien Munafò (6t)  
Fabrice Zobebe (6t)  
Catherine Lavallez (T&E)

## Mode de citation recommandé

6t-bureau de recherche ; Territoire et Energies. (2022). Affinement des hypothèses de base concernant l'apport des progrès technologiques dans la décarbonation de la mobilité.

## Remarques

Le rapport reflète le point de vue des auteurs. Ce dernier ne correspond pas nécessairement à celui des commanditaires.

---

# Table des matières

1. Contexte et objectifs.....	3
2. L'efficacité énergétique des véhicules.....	5
2.1. L'apport de l'efficacité énergétique des véhicules dans les scénarii globaux de décarbonation de la mobilité à horizon 2050.....	6
2.2. L'apport des différents progrès technologiques dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules.....	9
2.3. Focus sur l'électrification des véhicules et l'évaluation de leurs émissions carbone en ACV à moyen et long terme.....	15
3. L'intensité carbone de l'énergie.....	21
3.1. Situation actuelle.....	22
3.2. Projections à 2030 et 2050.....	26
4. Quelles interactions et hypothèses de ces deux variables pour le Grand Genève ?.....	35
4.1. Intégration de l'intensité carbone dans l'évaluation de l'ACV des véhicules électriques.....	35
4.2. Impacts potentiels de la mobilité électrique sur l'intensité carbone du kWh électrique.....	38
5. Enseignements et conclusion.....	41
6. Bibliographie.....	43
7. Tables des figures et annexes.....	46
7.1. Table des figures.....	46
7.2. Table des tableaux.....	47
8. Annexes.....	48

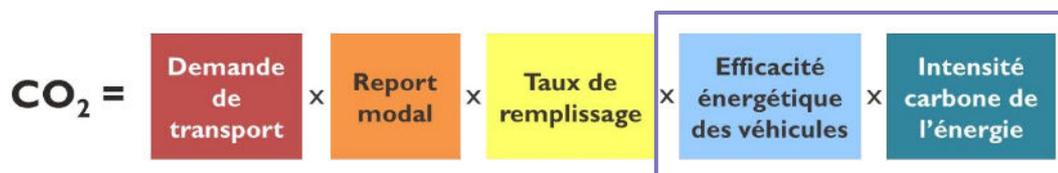
# 1. Contexte et objectifs

Dans le cadre de l'élaboration de sa stratégie multimodale 2050, le Canton de Genève et le Grand Genève doivent imaginer et planifier des mesures fortes à même de relever le défi très conséquent de décarbonation de la mobilité. **Pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris une division au minimum par 10 des émissions dans le transport de personnes est nécessaire, soit passer de 3 tonnes à 300 kg eq CO2 par personne/an (avec aérien) ou de 1,5 tonnes à 150 kg eq CO2 par personne/an (hors aérien)<sup>1</sup>.**

Le cadre structurant de l'approche de décarbonation de la mobilité est donné par l'**équation de Kaya** qui décompose les émissions totales en 5 familles de variables qui constituent autant de domaines d'intervention possibles et nécessaires : la demande de transport, la répartition modale, le taux de remplissage, l'efficacité énergétique des véhicules et enfin l'intensité carbone de l'énergie utilisée.

Les réflexions qui seront développées dans la stratégie multimodale 2050 se concentreront principalement sur les trois premières variables de l'équation. Il apparaît dès lors primordial de pouvoir fixer des ordres de grandeur sur lesquels tabler concernant les deux derniers facteurs, à savoir **l'efficacité énergétique des véhicules** et **l'intensité carbone de l'énergie**. L'affinement des hypothèses de base sur ces deux leviers permettra ainsi ensuite de mieux comprendre les marges de manœuvre possibles dans les trois premiers domaines de l'équation et d'en ajuster les valeurs pour atteindre la neutralité carbone escomptée à horizon 2050. Ce travail de précision sur ces deux familles de variables est l'objectif de la présente note.

Figure n° 1 : Deux grandeurs à préciser (cf. encadré)



Source : Bigo, A. (2020). Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.

Pour mener à bien cette mission, un état de la littérature a été entrepris capitalisant sur les dernières publications techniques et scientifiques ayant construit, à partir de scénarii, des projections de réduction des émissions carbone dans la mobilité des personnes obtenues par l'apport des progrès technologiques dans les véhicules et par l'évolution du contenu carbone de l'électricité.

Afin de rendre compte du degré d'implication de chacune de ces deux variables dans la décarbonation de la mobilité, elles ont été tout d'abord traitées individuellement avant de les regrouper pour obtenir de premiers ordres de grandeur sur lesquels le Grand Genève peut s'appuyer pour amorcer, sous l'angle de l'équation de Kaya, la construction de sa stratégie multimodale 2050. Enfin, nous évaluerons succinctement

<sup>1</sup> Maneco (2014). Bilan carbone du Grand Genève, Grand Genève (2020). Scénarios mobilité pour la transition écologique du Grand Genève : état des lieux et leviers d'actions. Cahier n°16-10.

---

les limites et les risques de cette approche basée sur les leviers technologiques.

**Le premier chapitre de cette étude porte spécifiquement sur la variable d'efficacité énergétique des véhicules.** Elle offre une vue globale non seulement de l'apport du facteur d'efficacité énergétique projeté dans différents scénarii macro de décarbonation de la mobilité en 2050, mais également un aperçu fin des leviers ou des progrès technologiques escomptés dans les véhicules qui devraient concourir à réduire les émissions carbone dans la mobilité des personnes. En tant que levier stratégique pour le Grand Genève dans la décarbonation de la mobilité individuelle, l'électrification des véhicules fait l'objet d'une composante centrale dans ce chapitre. Des hypothèses avancées en fin de chapitre donnent à voir les projections des émissions carbone en Analyse Cycle de Vie (ci-après ACV) (hors facteur électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) du véhicule électrique à différents horizons temporels (2020, 2030 et 2040-2050).

**Le second chapitre porte sur la dernière variable de l'équation de Kaya, à savoir l'intensité carbone de l'énergie.** En cohérence avec le choix de se focaliser sur les technologies de mobilité basées sur l'électricité, ce chapitre se concentre uniquement sur l'intensité carbone de l'électricité. Sur la base de projections du mix électrique consommateur suisse et français en 2030 et 2040-2050, elle évalue des ordres de grandeur auxquels s'attendre du contenu carbone de l'électricité à ces différentes années de référence.

**Le troisième chapitre de cette étude traite de l'interaction entre les différentes hypothèses préalablement construites dans les deux précédents chapitres,** à savoir celles relatives aux émissions carbone en ACV du véhicule électrique (hors facteur électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) et au contenu carbone de l'électricité, afin d'évaluer l'empreinte carbone globale de ce type de véhicule en 2030 et 2040-2050. En comparant ces estimations à l'empreinte carbone moyenne d'un véhicule thermique vendu et utilisé en 2020, il a été possible de fixer des ordres de grandeur des gains d'efficacité énergétique des véhicules électriques sur lesquels le Grand Genève peut s'appuyer pour alimenter sa stratégie multimodale 2050.

Dans l'optique d'affiner au mieux les hypothèses qui ont été succinctement construites pour chacune des variables de l'équation de Kaya, ces dernières ont été présentées puis débattues et évaluées par un collège de 6 experts dans le cadre d'un **webinaire organisé par le Grand Genève le 6 juillet 2022** :

- M. Aurélien Bigo, Institut Louis Bachelier ;
- M. Daniel Schaller, Office fédéral de l'énergie (OFEN) ;
- M. Elliot Romano, Université de Genève ;
- Mme Claire Tutenuit, Entreprise pour l'environnement (EPE) ;
- M. Marcel Ruegg, Service industriel genevois (SIG) ;
- M. Romain Sacchi, Institut Paul Scherrer (PSI).

Leurs appréciations des ordres de grandeur retenus, autant que leurs remarques et leurs points de vigilance, ont été intégrées dans la présente étude. Le compte rendu complet de l'atelier figure en annexe de ce rapport.

---

## 2. L'efficacité énergétique des véhicules

**L'efficacité énergétique (EE) des véhicules constitue la 4<sup>e</sup> variable de l'équation de Kaya.** Elle comprend l'ensemble des progrès technologiques attendus dans les véhicules (électrification du parc automobile, diminution de la consommation des moteurs thermiques, etc.) permettant de réduire les émissions carbone dans la mobilité des personnes et des marchandises.

Dans la plupart des études s'appuyant sur l'équation de Kaya pour évaluer les émissions carbone projetées dans la mobilité à un horizon temporel défini, l'efficacité énergétique des véhicules est généralement représentée en « base 1 », autrement dit comprise dans un intervalle entre 0 et 1. Un facteur de 0 signifie l'élimination totale des GES émis par les véhicules, inversement, un facteur de 1 désigne l'absence complète d'une réduction des émissions carbone dans ces derniers. La lecture de ces facteurs peut, également s'exprimer en termes de points de pourcentage « gagnés » dans la diminution des émissions carbone. À titre d'exemple, un facteur d'efficacité énergétique de 0,5 équivaut à une réduction pour moitié (50%) des GES émis par les véhicules.

Pour rendre compte du degré de contribution spécifique de cette variable dans la réduction globale des émissions carbone dans la mobilité, trois questionnements, du plus général au plus particulier, ont été explorés :

- 1) **Quels sont les ordres de grandeur quant à l'apport global de l'efficacité énergétique des véhicules dans les travaux traitant de scénarii de décarbonation par l'équation de Kaya ?**
- 2) **Quelles sont les contributions attendues des différents leviers de décarbonation au sein de la famille de variables concernant l'efficacité énergétique des véhicules, en particulier la place de l'électrification des véhicules ?**
- 3) **Enfin, concernant l'électrification en particulier, quels sont les ordres de grandeur d'émissions à attendre à moyen et long terme d'un véhicule électrique. En d'autres termes, à quel point peut-on s'attendre à ce que ces véhicules deviennent plus vertueux à l'avenir ?** Cette dernière étape a été d'une importance considérable dans l'évaluation de la variable d'efficacité énergétique des véhicules pour le Grand Genève étant donné l'ambition d'électrifier la totalité, ou quasiment, du parc de voitures privées à l'horizon 2050.

Les explorations de ces 3 questions sont présentées dans les 3 sous points ci-dessous.

## 2.1. L'apport de l'efficacité énergétique des véhicules dans les scénarii globaux de décarbonation de la mobilité à horizon 2050

Afin d'estimer aux mieux les projections du facteur d'efficacité énergétique des véhicules en 2050, nous avons analysé finement la littérature scientifique et technique qui, par le biais de différents scénarii, dresse un certain nombre de postulats et d'hypothèses concernant les progrès technologiques à attendre dans ce domaine.

Les études mobilisées dans le cadre cette analyse prospective et comparative se veulent expressément variées et issues de sources diverses, relevant tant d'acteurs publics que privés, dans l'optique de mettre en lumière l'hétérogénéité des grandeurs projetées et d'en extraire d'éventuelles analogies ou disparités. Le tableau ci-dessous recense l'ensemble des scénarii de décarbonation analysés à partir desquels, pour partie, la grandeur de la variable d'efficacité énergétique des véhicules a pu être extraite et ainsi comparée entre chaque étude.

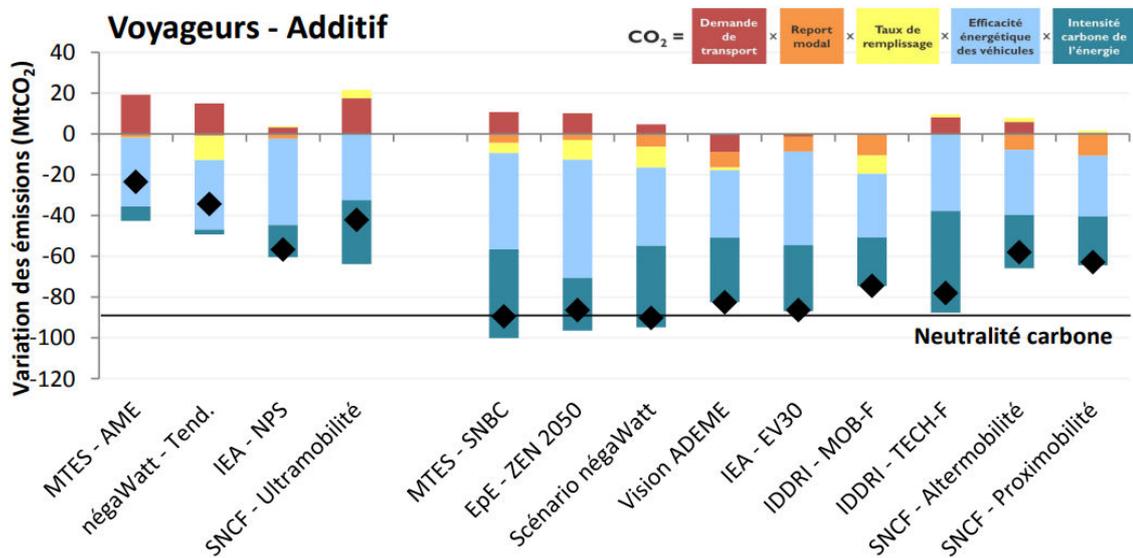
Tableau 1 : Les scénarii mobilisés dans l'analyse comparative des grandeurs d'efficacité énergétique projetées des véhicules à horizon 2050

Acteur (public ou privé) et scope des scénarii de décarbonation	Scénarii
Office fédéral de l'énergie (OFEN) > Acteur public > Scope 1	Scénario « Zéro émission nette » (ZERO), 4 variantes sous-jacentes
Agence Internationale de l'Énergie (IEA) > Acteur public > Scope 2	Scénario tendanciel « New Policies Scenario » (NPS)
Agence de la transition écologique (ADEME) > Acteur public > Scope 1	1) Scénario tendanciel (décarbonation insuffisante, surtout côté marchandises)
	2) Scénario 1 (baisse importante de la demande)
	3) Scénario 2 (soutenable au cœur de la transition)
	4) Scénario 3 (la recherche de l'efficacité prime)
	5) Scénario 4 (la technologie s'immisce dans les moteurs et la gestion des mobilités)
Ministère de la transition écologique (MTES) > Acteur public > Scope 1	1) Scénario tendanciel « Avec Mesures existantes » (AME) 2021 2) Scénario « Stratégie nationale bas-carbone avec mesures supplémentaires » (AMS)
Association « Entreprise pour l'Environnement (EPE) > Acteur associatif de l'économie privée > Scope 1	Scénario « Zéro émission nette 2050 » (ZEN)
Association NégaWatt > Acteur associatif de l'économie privée > Scope 1	Scénario NégaWatt (volontariste)
Carbone 4 > Acteur de l'économie privée > Scope 1	1) Trajectoire DEC (inspirée des scénarii Negatep, RTE médian, Ancre ELE et UFE)
	2) Trajectoire DIV (inspirée des scénarii ANCRE DIVE, RTE nouveau mix et DGEC AMO)
	3) Trajectoire EFE (inspirée des scénarii ADEME, GRDF, ANCRE sob et Encilowcarb renforcé)
	4) Trajectoire SOB (inspirée des scénarii NégaWatt, WWF et Greenpeace)
Küng et al. > Acteurs académiques > Scope 1	Cette étude traite des 3 leviers pour atteindre les objectifs de décarbonation dans la mobilité : 1) Réduire la demande de mobilité 2) Minimiser la demande énergétique des véhicules 3) Substituer les vecteurs énergétiques
Institut indépendant de recherche sur les politiques et plateforme de dialogue multiacteurs (IDDRI) > Acteur de l'économie privée > Scopes 1	1) Scénario Mob-F (inspiré de la stratégie EFE) 2) Scénario Tech-F (inspiré de la stratégie DIV)
Aurélien Bigo > Acteur académique > Scope 2 pour les scénarii ci-contre	Sa thèse compare différents scénarii possibles (tendanciels et volontaristes) de décarbonation de la mobilité par le biais de l'équation de Kaya. Hormis les scénarii ci-dessus dont sa thèse fait référence, Aurélien Bigo en présente quelques-uns supplémentaires : 1) Le scénario EV30 (IEA) 2) Le scénario tendanciel Ultra mobilité, Altermobilité et Proximobilité (SNCF)
Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) et France Stratégie > Acteur public > Scope 1	1) Scénario « Ambition de base » 2) Scénario « Poussée de sobriétés » 3) Scénario « Poussée de technologie » 4) Scénario « Hypercontraint » 5) Scénario « Pire climatique » 6) Scénario « Pari technologique » 7) Scénario « Pari sociétal »

Ce travail d'évaluation et de mise en perspective des variables de l'équation de Kaya à partir d'une pluralité de scénarii de décarbonation de la mobilité a été mené par Aurélien Bigo dans sa thèse intitulée « *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement* », soutenue en 2020. Les figures ci-dessous en exposent les résultats de ce travail de comparaison. Il est à préciser que certains scénarii des études présentées ci-dessus ne figurent pas dans les deux illustrations suivantes (scénarii OFEN, scénario Küng et al. et scénarii du CGEDD), ceux-ci n'ayant pas été conçus sous l'angle de l'équation de Kaya et ne permettant ainsi pas l'identification et la contribution respective de chacune des variables dans la décarbonation globale de la mobilité des personnes en 2050. Ces scénarii ont cependant fait l'objet d'une analyse approfondie et fine dans le sous-chapitre suivant, ayant trait aux progrès technologiques spécifiques dans les véhicules à partir desquels sont escomptés des gains d'efficacité énergétique.

Comme on peut le constater dans la figure ci-dessous, présentant la réduction ou l'augmentation cumulée des émissions carbone obtenues par l'apport successif de chacune des variables de l'équation de Kaya dans un certain nombre de scénarii, il **existe un consensus unanime et univoque du rôle prépondérant et déterminant joué par l'efficacité énergétique des véhicules dans la décarbonation de la mobilité des personnes à horizon 2050**. Indépendamment du scénario considéré et comparativement aux autres variables de l'équation de Kaya, l'efficacité énergétique des véhicules représente une contribution majeure pour approcher ou atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050 dans le secteur de la mobilité des personnes.

Figure n° 2 : Contribution des différentes variables de l'équation de Kaya dans la diminution ou l'augmentation des émissions de GES dans la mobilité des personnes en 2050, selon différents scénarii<sup>2</sup>

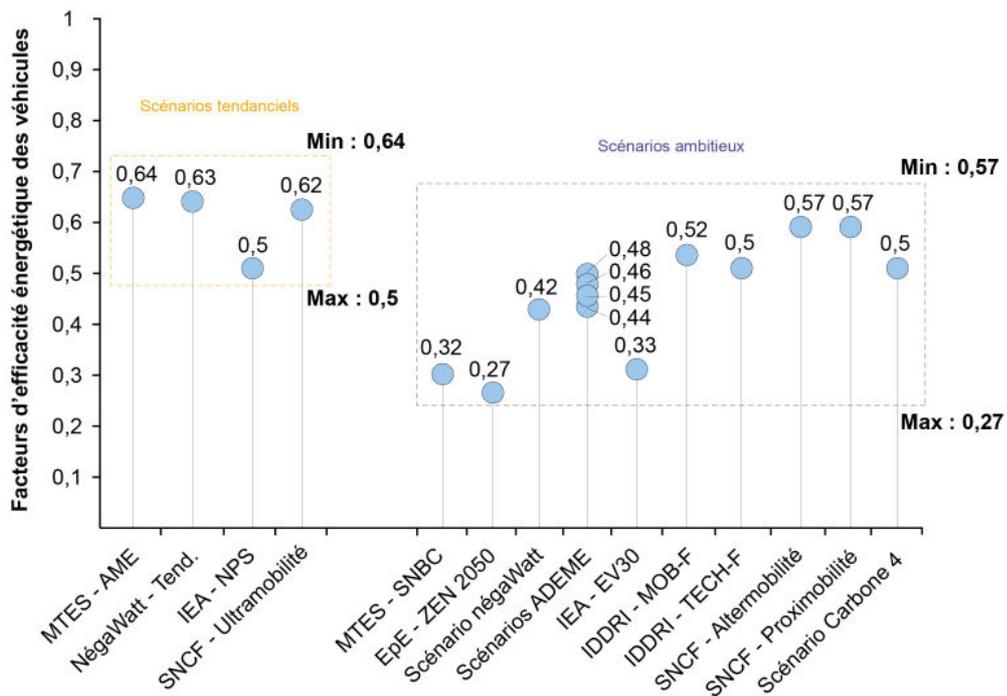


Source : Bigo, A. (2020). Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.

<sup>2</sup> Les losanges noirs représentent les baisses des émissions de CO<sub>2</sub>. Ces baisses sont plus fortes dans les scénarios volontaristes que tendanciels.

La figure 3 ci-dessous, qui illustre uniquement l'évaluation et la distribution du facteur d'efficacité énergétique entre chacun des scénarii de décarbonation présenté en figure 2<sup>3</sup>, donne à voir des baisses notoires des émissions de GES obtenus par l'amélioration des progrès technologiques dans les véhicules. En effet, l'analyse comparative de la contribution spécifique de cette variable dans la décarbonation globale de la mobilité des personnes à horizon 2050 met en évidence une diminution majeure des émissions carbone, comprise dans **une fourchette entre -36%** (facteur de 0,64 dans le scénario tendanciel « Avec mesures existantes » du MTES) **et -73%** (facteur de 0,27 dans le scénario ZEN de l'EpE). On remarque par ailleurs un écart-type relativement faible entre les projections des scénarii tendanciels et ambitieux à l'égard de ce facteur, dénotant une certaine concordance dans les hypothèses considérées dans l'évaluation de ce dernier. Il est à préciser que les réductions des émissions carbone mises en évidence ci-dessus, obtenues par les gains d'efficacité énergétique des véhicules, sont essentiellement dues à l'évolution du parc de voitures du thermique à l'électrique et dans une moindre mesure à l'amélioration de l'ACV des véhicules.

Figure n° 3 : Analyse comparative du facteur d'efficacité énergétique des véhicules en 2050 dans la mobilité des personnes, selon différents scénarii (réalisation 6-t bureau de recherche)



Source : Ibid, 2020.

<sup>3</sup> Le scénario « Vision » de l'ADEME, présent dans la fig. 2, a été remplacé dans la fig. 3 par 5 scénarii publiés plus récemment ayant fait l'objet d'une décomposition des émissions carbone projetées dans la mobilité des personnes sous l'angle de l'équation de Kaya. Ces derniers sont issus du rapport suivant : ADEME (2021). Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat. Les 4 scénarii construits par Carbone 4, s'accordant sur une amélioration de 50% de l'efficacité énergétique des véhicules, ont été également inclus dans la fig. 4. Le rapport suivant en est la source : Carbone 4 (2014). Étude des 4 trajectoires du DNTE. Une vision pédagogique des 4 trajectoires étudiées dans le cadre du débat national sur la transition énergétique.

---

## 2.2. L'apport des différents progrès technologiques dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules

Si les scénarii présentés précédemment offrent un aperçu global de la réduction des émissions carbone à attendre de l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules, **un éclairage quant aux différents leviers menant à cette meilleure efficacité est nécessaire.**

L'analyse comparative (cf. Fig. 2) met en évidence **5 grands progrès ou leviers technologiques dans les véhicules pour contribuer à réduire de façon progressive et pérenne les émissions de GES.**

Ces 5 leviers sont les suivants :

- 1) L'électrification du parc automobile ;
- 2) L'intégration dans le parc automobile de véhicules hybrides normaux et rechargeables ;
- 3) La réduction de la consommation des moteurs thermiques ;
- 4) La diminution de la taille des véhicules et l'allègement du poids des véhicules ;
- 5) La réduction de la vitesse moyenne des véhicules.

Trois leviers complémentaires sont aussi mis en évidence dans ces études, bien qu'ayant davantage trait à la variable d'intensité carbone de l'énergie qu'à celle de l'efficacité énergétique des véhicules. Ces 3 leviers complémentaires sont les suivants :

- 1) L'utilisation croissante de biocarburants (2<sup>e</sup> génération) et de biogaz ;
- 2) L'intégration dans le parc automobile de véhicules à pile à combustible hydrogène ;
- 3) L'utilisation de carburants synthétiques.

### a) 3 leviers faisant consensus

Si un consensus semble se dégager autour d'un petit nombre de leviers dans la décarbonation à venir de la mobilité des personnes, des points de divergence sont néanmoins observables, reflétant à la fois l'incertitude évidente dans l'appréhension de la mobilité de demain et l'hétérogénéité des leviers existants ou envisagés pouvant être actionnés dans l'atteinte de la neutralité carbone dans la mobilité.

La décarbonation de la mobilité des personnes à horizon 2050 est principalement portée par 3 leviers avec des degrés de contribution relativement similaires et conséquents dans les scénarii étudiés. Les 3 progrès technologiques conjoints sur lesquels s'accordent la plupart des auteurs sont les suivants :

- 1) **L'électrification du parc automobile : parmi tous les leviers, elle représente celui qui obtient un consensus quasi unanime dans la décarbonation de la mobilité des personnes, indépendamment du scénario considéré. Tant dans les scénarii tendanciels que volontaristes, l'électrification de la mobilité est considérée comme une donnée fondamentale pour décarboner la mobilité à horizon**

---

**2050** (100% des véhicules neufs vendus aux particuliers sont électriques dans le scénario AMS du MTES ; gains d'efficacité énergétique important dans le scénario Négawatt par la pénétration des véhicules électriques ; respectivement 1/3 de véhicules électriques et 3/4 de VP électriques ou hybrides en 2050 dans les trajectoires EFE et DIV de Carbone 4 ; 30% de véhicules électriques parmi les ventes de véhicules en 2030 dans le scénario NPS de l'IEA ; renforcement intensif de l'électrification des véhicules à la fois dans la variante de base du scénario ZERO que dans la variante A du scénario ZERO de l'OFEN). **Une attention particulière a été portée sur la contribution spécifique de ce levier dans la décarbonation de la mobilité des personnes dans les sous-chapitres suivants, les gains d'efficacité énergétique de ces types de véhicules étant étroitement corrélés et dépendants tant du contenu carbone de l'électricité servant à leur alimentation que des émissions nécessaires à leur construction, deux composantes sur lesquelles le Grand Genève n'a aucune prise directe puisque dépassant son cadre institutionnel et son champ d'influence ou de compétence.**

- 2) **L'intégration progressive de véhicules hybrides rechargeables** : la pénétration progressive des véhicules hybrides et hybrides rechargeables dans le parc roulant à horizon 2050 revêt également une importance stratégique pour décarboner la mobilité dans bon nombre de scénarii, hormis dans ceux de l'OFEN et de l'IEA (gains d'EE grâce à la performance accrue des véhicules hybrides dans le scénario Négawatt ; l'hybridation constitue, avec le passage à la motorisation électrique, le principal levier d'efficacité énergétique des véhicules dans le scénario 4 de l'ADEME ; 3/4 de VP électriques ou hybrides en 2050 dans la trajectoire DIV de Carbone 4 ; les véhicules électriques ou hybrides représentent 40% du trafic en 2050 dans le scénario DEC de Carbone 4 ; 1/3 de véhicules hybrides rechargeables dans la trajectoire EFE de Carbone 4 ; 26% de véhicules hybrides rechargeables dans le parc roulant de voitures en 2050 dans le scénario AME 2021 du MTES).

Selon **Aurélien Bigo**, chercheur associé à l'Institut Louis Bachelier, la contribution des véhicules hybrides et hybrides rechargeables dans la décarbonation de la mobilité ne peut avoir qu'un impact limité dans le futur puisque ces derniers ne pourront plus être commercialisés en Europe à partir de 2035, conformément aux dispositions réglementaires votées par le Parlement européen le 9 juin 2022. Les financements alloués à la recherche et à l'innovation de ces types de véhicule sont, selon lui, amenés à décroître massivement et, corollairement, les potentiels gains d'efficacité énergétique qui auraient pu en suivre.

- 3) **La réduction de la consommation des moteurs thermiques** : la réduction de la consommation des véhicules thermiques constitue, au même titre que l'électrification du parc automobile et l'intégration progressive des véhicules hybrides normaux et rechargeables, un levier majeur dans bon nombre de scénarii pour diminuer de façon notable les émissions carbone dans les véhicules (amélioration du rendement des moteurs thermiques de 4,5L/100 Km dans le scénario Mob-F de l'IDDRI ; respectivement -16% et -60% de la consommation des moteurs thermiques dans le scénario

---

tendanciel de l'ADEME et de NégaWatt ; consommation des véhicules de 6,6 L/100 Km pour les véhicules thermiques en 2040 dans le scénario NPS de l'IEA ; consommation réelle pour les véhicules thermiques vendus en 2030 de 4L/100 Km dans le scénario AMS du MTES et respectivement 3L/100 Km et 2L/100 Km dans les trajectoires DEC et DIV de Carbone 4 ; consommation réelle de 5,6 L/100 Km des véhicules à essence et de 4,8L/100 Km des véhicules diesel dans le scénario AME 2021 du MTES).

#### b) 2 leviers davantage discutés

**Deux autres leviers sont également cités pour concourir à réduire les émissions carbone des véhicules.** Contrairement aux 3 leviers présentés précédemment, autour desquels un consensus quasi unanime chez les auteurs a pu être mis en évidence, la contribution des deux leviers développés ci-après pour décarboner la mobilité fait état de divergences au sein des scénarii mobilisés. Ces leviers divergents sont les suivants :

- 1) **La diminution de la taille des véhicules et l'allègement du poids des véhicules** : la diminution de la taille des véhicules et l'allègement du poids des véhicules dans la décarbonation de la mobilité ne sont recensés que dans une poignée de scénarii. Seuls les scénarii 1 et 2 de l'ADEME (respectivement -27% et -13% du poids des voitures neuves dans les scénarii 1 et 2 de l'ADEME), le scénario tendanciel NPS de l'IEA, le scénario trajectoire SOB de Carbone 4 et le scénario Mob-F de l'IDDRI abordent ce levier pour accompagner la réduction des émissions carbone dans les véhicules.
- 2) **La réduction de la vitesse des véhicules** : la contribution de l'abaissement de la vitesse moyenne des véhicules dans la diminution des émissions de GES dans la mobilité joue un rôle prépondérant dans les scénarii 1 et 2 de l'ADEME (respectivement -12% et -9% de la vitesse moyenne des véhicules dans les scénarii 1 et 2 de l'ADEME), dans la trajectoire SOB de Carbone 4 et dans une moindre mesure dans le scénario 3 de l'ADEME.

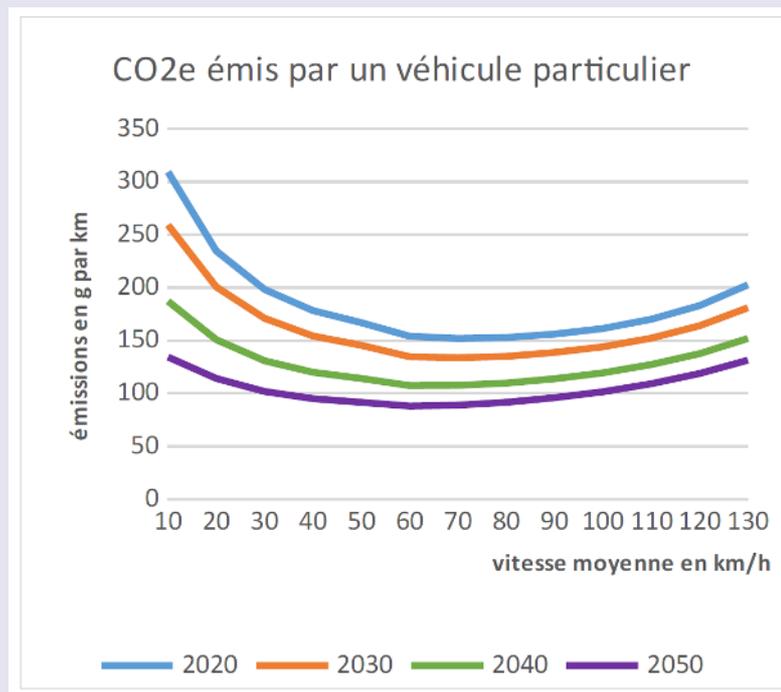
**En ce qui concerne ces deux leviers, ayant trait aux seules caractéristiques des véhicules (taille, poids et vitesse), on peut regretter que leur contribution dans la décarbonation de la mobilité ne soit pas davantage soutenue et encadrée par des dispositions réglementaires fortes au niveau des Etats.** En effet, des limitations relatives à la taille, au poids et à la vitesse des véhicules vendus à ce jour comporteraient des bénéfices certains et immédiats pour accompagner le tournant énergétique fort devant s'opérer dans la mobilité en accord avec les objectifs de l'Accord de Paris.

Dans le rapport intitulé « Scénarios mobilité pour la transition écologique du Grand Genève : état des lieux et leviers d’actions » (2021) au sein duquel 6t bureau de recherche a eu l’occasion de contribuer, il a été mis en évidence **une réduction de 6 à 7% des émissions carbone des véhicules privés en diminuant leur poids de 100 kg.**

L’impact de la réduction de la vitesse moyenne des véhicules (véhiculer léger, particulier, utilitaire et poids-lourd) sur la diminution des émissions carbone a été étudié dans le rapport du Cerema intitulé « Emissions routières des polluants atmosphériques. Courbes et facteurs d’influence. » (2021). Dans le cas particulier du parc de véhicules particuliers, composé à 68% de véhicules diesel, 29% de véhicules à essence et de 3% d’autres types de motorisation en 2020 en France, **on observe une diminution de 6% des émissions carbone (en g/km) dans le cas hypothétique d’un changement de la limitation de 120 km/h à 110 km/h sur les autoroutes.**

À titre d’exemple, l’abaissement conjoint de la vitesse de 10 km/h sur l’autoroute et de 200 kg du poids des véhicules privés permettrait donc **une réduction immédiate comprise entre 18 et 20% des émissions carbone des véhicules privés.**

Figure n° 4 : Emissions de CO<sup>2</sup> (en g/km) et d’un véhicule particulier en fonction de la vitesse



Source : Cerema (2021). Emissions routières des polluants atmosphériques. Courbes et facteurs d’influence.

---

### c) 3 leviers complémentaires

**Trois leviers complémentaires** ont été identifiés dans les scénarii macro étudiés. Bien que davantage à relier à l'intensité carbone de l'énergie qu'à l'efficacité énergétique des véhicules, ces leviers nous semblent primordiaux à mettre en lumière puisqu'ils poursuivent l'objectif commun d'offrir des pistes pour décarboner la mobilité des personnes d'ici à 2050. Ces trois leviers complémentaires sont les suivants :

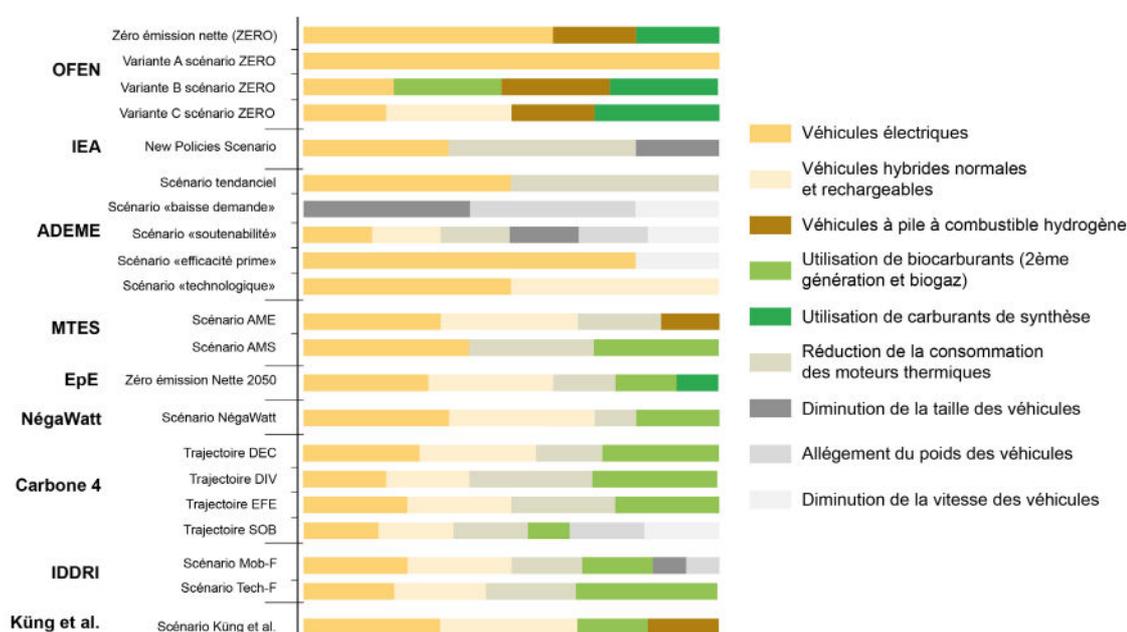
- 1) **L'utilisation croissante de biocarburants (2<sup>e</sup> génération) et de biogaz** : la contribution de biocarburants de 2<sup>e</sup> génération et de biogaz dans la décarbonation de la mobilité n'obtient pas un consensus unanime parmi les scénarii globaux de décarbonation. Alors qu'un certain nombre de scénarii n'abordent pas ce levier dans leur projection de décarbonation (scénarii OFEN, hormis variante C du scénario ZERO, scénario NPS de l'IEA, scénarii de l'ADEME, scénario AME 2021 du MTES), d'autres scénarii sont beaucoup plus optimistes dans l'utilisation des biocarburants (forte pénétration des biocarburants liquides et gazeux dans le scénario Tech-F de l'IDDRI ; production de respectivement 10 et de 15 Mtep (mégatonne équivalent pétrole) de biocarburants dans les trajectoires DIV et DEC de Carbone 4 ; une indépendance du pétrole grâce au mix biogaz/GNV, à l'électricité et aux biocarburants 2G dans la trajectoire EFE de Carbone 4 et dans le scénario AMS du MTES) et du biogaz (rôle important du biogaz et des gaz synthétiques dans la variante B du scénario ZERO de l'OFEN et dans les deux scénarii de l'IDDRI ; -12 MtCO<sub>2</sub>eq d'émissions dans les transports grâce au BioGNV dans le scénario ZEN de l'EPE ; respectivement 1/3 et 75% de véhicules thermiques à gaz dans les trajectoires EFE et SOB de Carbone 4 ; potentiel de réduction de 1,5 mio de tonnes de CO<sub>2</sub> en remplaçant l'essence et le diesel par du gaz naturel carburant dans le scénario de Küng et al., soit une baisse de 15% des émissions carbone totales dans le secteur du transport de personnes) dans leur participation à réduire les émissions carbone des véhicules privés en 2050.
- 2) **L'intégration dans le parc automobile de véhicules à pile à combustible hydrogène** : la pénétration de ce type de véhicules dans le parc roulant à horizon 2050 n'est référencée que dans 5 scénarii (scénario ZERO et variantes B et C du scénario ZERO de l'OFEN, scénario tendanciel de l'AME 2021 du MTES et scénario de Küng et al.) avec un degré de contribution relativement peu conséquent. Si le scénario de Küng et al. n'évalue pas la part de marché de ce type de véhicule dans le parc roulant à horizon 2050, il identifie néanmoins le potentiel de réduction d'émissions de GES de ce type de motorisation, de l'ordre de -25%. Alors que les scénarii AME 2021 du MTES et ZERO de l'OFEN attribuent à l'hydrogène un rôle mineur dans la transition énergétique à venir dans la mobilité (part de marché de l'hydrogène dans le parc roulant de 2050 de 1%), la variante B du scénario ZERO de l'OFEN table sur un rôle plus important de l'hydrogène, sans pour autant avancer de grandeurs.

Quand bien même le rôle de l'hydrogène dans la décarbonation de la mobilité des véhicules privés ne semble pas déterminant dans les scénarios étudiés, cette technologie pourrait cependant avoir un **impact plus important dans le secteur du transport de marchandises.**

- 3) **L'utilisation de carburants synthétiques** : elle ne figure que dans les scénarii de décarbonation de la mobilité de l'OFEN (hormis la variante A) et joue un rôle plus important dans les variantes B et C que dans le scénario ZERO.

Afin d'obtenir une vue détaillée et globale du degré d'intensité de chacun des leviers de décarbonation dans l'ensemble des scénarii considérés, le schéma suivant a été produit (cf Fig.5). **Il permet de rendre compte de façon schématique et synthétique la participation conjointe et cumulée de tous les leviers présentés précédemment au travers desquels la décarbonation de la mobilité des personnes en 2050 est attendue pour atteindre les objectifs de neutralité carbone dans ce secteur.**

Figure n° 5 : Analyse comparative du degré d'intensité des leviers de décarbonation en matière d'efficacité énergétique des véhicules et d'intensité carbone de l'énergie dans la mobilité des personnes en 2050, selon différents scénarii



La majorité des experts s'accordent sur le rôle prépondérant et majeur des progrès technologiques pour décarboner la mobilité des personnes en 2050, en particulier celui relevant de l'électrification du parc automobile. Toutefois, ces derniers soutiennent que la technologie seule ne suffira pas à atteindre les objectifs de réduction des émissions carbone à cet horizon si elle ne s'accompagne pas de profonds changements dans les comportements de mobilité des individus tant en termes de sobriété (moins de déplacements en nombre et en distance parcourue) que de durabilité (accentuation du report modal vers des moyens de transport nettement moins carbonés comme les transports en commun, quasi-entièrement décarboné comme le vélo ou entièrement décarboné comme la marche).

Selon Aurélien Bigo, les incitations à davantage de sobriété dans les habitudes de déplacement des individus (moins de déplacements en nombre et distance parcourue) comporteraient des gains immédiats dans la réduction des émissions carbone dans la mobilité des personnes, de l'ordre d'un facteur 2 !

---

### 2.3. Focus sur l'électrification des véhicules et l'évaluation de leurs émissions carbone en ACV à moyen et long terme

Comme nous avons pu le mettre en évidence dans le sous-chapitre précédent, **l'électrification des véhicules est un axe prioritaire et une piste commune dans l'ensemble des scénarii analysés pour décarboner en profondeur et de façon pérenne la mobilité des personnes.**

Compte tenu de l'ambition du Grand Genève d'électrifier la totalité, ou quasiment, du parc de voitures privées à l'horizon 2050, un état de la littérature complémentaire a été réalisé pour déterminer les émissions carbone projetées en ACV de ces véhicules à même de dresser de premières hypothèses servant à alimenter la variable d'efficacité énergétique des véhicules de l'équation de Kaya du Grand Genève.

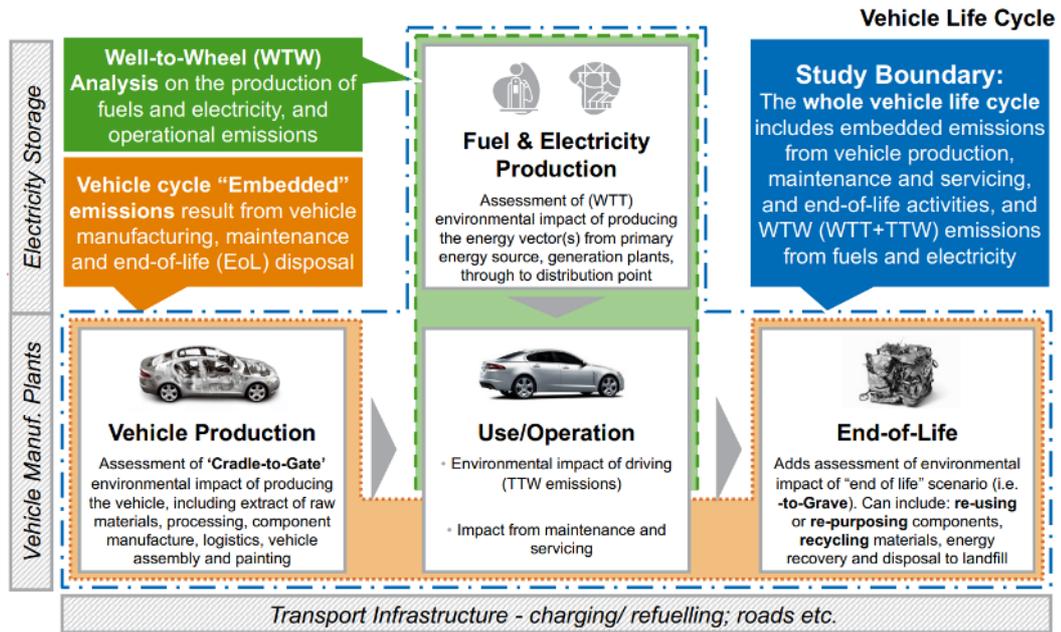
#### a) Les composants du calcul en Analyse de Cycle de Vie d'un véhicule électrique

Afin d'évaluer l'empreinte carbone d'un véhicule électrique dont les émissions directes sont nulles, il est nécessaire de recourir à la méthode de calcul dite en ACV. Cette dernière recense l'ensemble des émissions carbone émises durant la phase d'usage du véhicule, constitutives du carbone contenu dans l'électricité produite pour son alimentation, mais aussi plus transversalement depuis la production du véhicule (extraction du minerai pour la fabrication de l'électronique et de la batterie, manufacture du véhicule, etc.), en passant par sa maintenance et les services requis durant sa mise en circulation, jusqu'au recyclage de ses pièces (seconde vie de la batterie, réemploi de certains composants, etc.).

#### Différents termes associés à la méthode de calcul en ACV d'un véhicule électrique :

- **Well-to-Wheel (WTW)** : cette méthode de calcul, dite du « puits à la roue » en français, évalue tant les émissions carbone qui résultent de la production et de l'acheminement de l'électricité pour alimenter les véhicules électriques que celles qui encadrent leur maintenance et service.
- **Well-to-Tank (WTT)** : cette méthode calcule uniquement les émissions carbone associées à la production et à l'acheminement de l'électricité servant à l'alimentation des véhicules électriques. Il correspond au contenu carbone de l'énergie.
- **Tank-to-Wheel (TTW)** : cette méthode calcule, dans le cas des véhicules thermiques, les seules émissions carbone en sortie du pot d'échappement issues de la combustion interne du moteur. Ces dernières sont nulles concernant les véhicules électriques.

Figure n° 6 : Les différents composants du calcul en « Analyse Cycle de Vie »

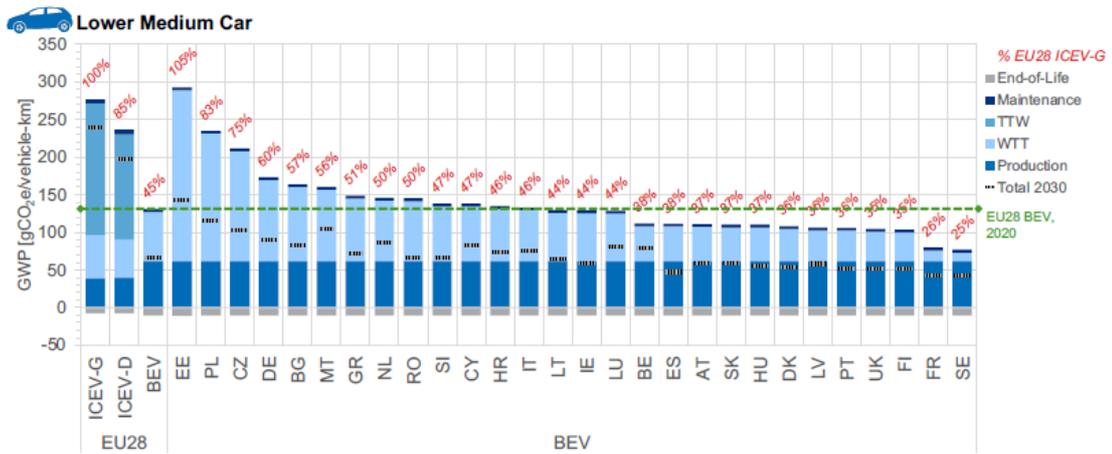


Source : Ricardo Energy & Environment (2022). Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through Life Cycle Assessment.

b) Standardisation et comparabilité de l'ACV d'un véhicule électrique dans les études analysées

Comme nous pouvons le constater dans la figure suivante, les émissions actuelles en ACV d'un véhicule électrique sont très fluctuantes et différentes selon les pays de l'Union européenne. Ces importantes variations sont la résultante du contenu carbone de l'électricité (WTT), autrement dit de la source énergétique utilisée (charbon, nucléaire, etc.) pour produire l'électricité servant à l'alimentation des véhicules électriques.

Figure n° 7 : Comparaison des émissions actuelles en ACV (en g CO<sub>2</sub> e./veh.km) d'un véhicule électrique dans les différents pays de l'Union européenne<sup>4</sup>



Source : Ibid., 2022.

ICEV-G : Internal Combustion Engine Vehicle-Gasoline  
 ICEV.D : Internal Combustion Engine Vehicle-Diesel  
 BEV : Battery Electric Vehicle

<sup>4</sup> Ces valeurs diffèrent légèrement de celles évaluées en Suisse dont Ecoinvent, Mobitoil et KBOB en sont les références. Ces derniers estiment en 2018 les émissions en ACV d'un véhicule électrique à 126 CO<sub>2</sub>e./veh.km et à 318 CO<sub>2</sub>e./veh.km (émissions liées à la construction et à l'entretien des routes incluses) les émissions moyennes des véhicules thermiques (essence et diesel).

---

c) Quelles émissions d'un véhicule électrique en ACV aujourd'hui, 2030, 2040 et 2050 ?

Pour garantir la standardisation et la comparabilité des émissions en ACV projetées des véhicules électriques, nous avons neutralisé le contenu carbone de l'électricité (WTT). Cet élément est, par ailleurs, traité spécifiquement pour le contexte du Grand Genève dans le chapitre 3 ci-dessous.

De la même façon, n'étant intégrées que dans un petit nombre de projections dans les calculs totaux en ACV des véhicules électriques, **les émissions relatives à la construction ou la requalification des infrastructures routières n'ont pas été comptabilisées dans les hypothèses des différents auteurs présentées dans ce sous-chapitre** (représentant approximativement 16% des émissions carbone totales en ACV du véhicule électrique). Les émissions carbone en ACV qui résultent de ces différents ajustements ont donc trait qu'au seul véhicule à proprement dit, somme des GES émis pour sa construction et son recyclage.

Dans la littérature francophone et anglophone, plusieurs auteurs ont évalué, à différents horizons temporels, les émissions potentielles en ACV d'un véhicule électrique et comparé leurs valeurs à celles émises par différentes motorisations (essence, diesel, etc.).

Le tableau ci-après recense et compare les hypothèses les plus à jour de différents auteurs concernant les projections en ACV d'un véhicule électrique selon diverses années de référence. Il se compose des éléments suivants :

- **La décomposition de l'ACV** (hors intensité du contenu carbone de l'électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) actuelle et projetée d'un véhicule électrique permettant de mettre en lumière les concordances et les divergences dans les hypothèses des émissions carbone associées aux différentes étapes de vie du véhicule (manufacture et recyclage du véhicule) dans les études analysées ;
- **La somme de la décomposition de l'ACV** d'un véhicule électrique (hors intensité du contenu carbone de l'électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes), soit la grandeur servant de point de comparaison entre les différentes études ;

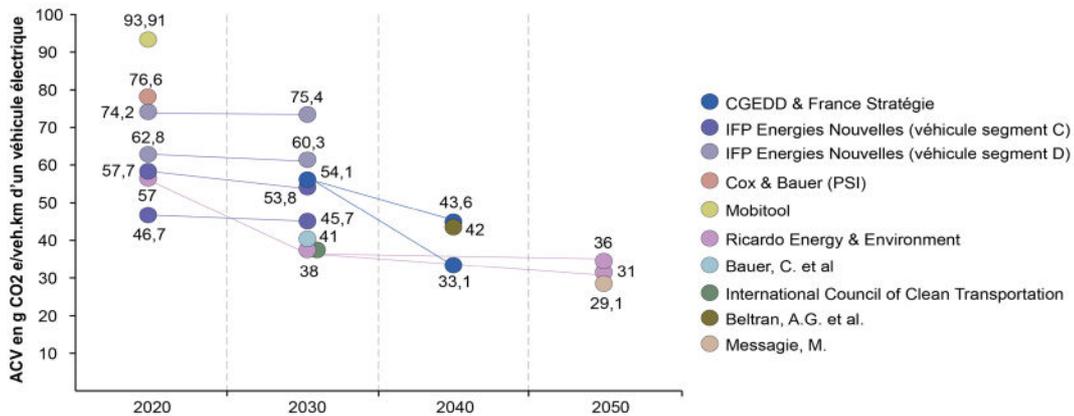
Afin d'obtenir des résultats comparables, il est à préciser que **les unités des émissions carbone en ACV des diverses études ont été standardisées en g CO<sub>2</sub>e./veh.km.**

Tableau 2 : Les hypothèses de l'ACV (en g CO2e./veh.km) d'un véhicule électrique sans la phase d'utilisation et les émissions relatives à la construction et à l'entretien des routes, selon diverses études

Auteur	Année	Décomposition de l'ACV (en g CO2e./veh.km)	ACV (en g CO2e./veh.km)
Message, M. (2021)	2050	Manufacture, maintenance et recyclage du véhicule : 13 Batterie : 13 Manufacture du moteur : 3,1	29,1
Bauer C. et al. (2015)	2030	Manufacture, maintenance et recyclage du véhicule : 30 Manufacture du moteur : 1 Batterie : 10	41
International Council of Clean Transportation (2021)	2030	Manufacture du véhicule : 24 Maintenance du véhicule : 4 Batterie : 10	38
Ricardo Energy & Environment (2022)	2020	Production du véhicule : 63 Maintenance : 4 Recyclage du véhicule : -10	57
	2030	Production du véhicule : 44 Maintenance : 3 Recyclage du véhicule : -9	38
	2050	Production du véhicule : 41 Maintenance : 3 Recyclage du véhicule : -8	36
		Production du véhicule : 33 Maintenance : 2 Recyclage du véhicule : -4	31 (Scénario TECH 1.5)
Cox, B. et Bauer, C. (2020)	2018	Carrosserie : 45 Production du moteur : 12,6 Batterie : 19	76,6
Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable et France Stratégie (2022)	2030	Pneus : 1,5 Véhicule : 23 Batterie : 29,6	54,1
	2040	Longévité du véhicule : 150'000 km Pneus : 1,5 Véhicule : 23 Batterie : 19,1	43,6
		Longévité du véhicule : 200'000 km Pneus : 1,5 Véhicule : 17,3 Batterie : 14,3	33,1
IFP Energies nouvelles (2019)	2019	Véhicule électrique + (batterie plus importante) de moyenne gamme (véhicule du segment C) Cycle de vie du véhicule : 24,6 Cycle de vie de la batterie : 30,7 Cycle de vie des pneus : 2,4	57,7
		Véhicule électrique de moyenne gamme (véhicule du segment C) Cycle de vie du véhicule : 24,6 Cycle de vie de la batterie : 19,7 Cycle de vie des pneus : 1,4	45,7
		Véhicule électrique + haut de gamme (véhicule du segment D) Cycle de vie du véhicule : 31,4 Cycle de vie de la batterie : 41,4 Cycle de vie des pneus : 1,4	74,2
		Véhicule électrique haut de gamme (véhicule du segment D) Cycle de vie du véhicule : 31,4 Cycle de vie de la batterie : 30 Cycle de vie des pneus : 1,4	62,8
	2030	Véhicule électrique + (batterie plus importante) de moyenne gamme (véhicule du segment C) Cycle de vie du véhicule : 22,5 Cycle de vie de la batterie : 29,3 Cycle de vie des pneus : 2	53,8
		Véhicule électrique de moyenne gamme (véhicule du segment C) Cycle de vie du véhicule : 22,5 Cycle de vie de la batterie : 21,7 Cycle de vie des pneus : 2	46,2
		Véhicule électrique + haut de gamme (véhicule du segment D) Cycle de vie du véhicule : 29,3 Cycle de vie de la batterie : 44,4 Cycle de vie des pneus : 1,7	75,4
		Véhicule électrique haut de gamme (véhicule du segment D) Cycle de vie du véhicule : 29,3 Cycle de vie de la batterie : 29,3 Cycle de vie des pneus : 1,7	60,3
Mobitool / Ecoinvent (2020)	2020	Maintenance du véhicule : 6,7 Construction et recyclage du véhicule : 87,21	93,91
Beltran, A.G. et al. (2020)	2040	Manufacture, maintenance et recyclage du véhicule : 28 Batterie : 7 Manufacture du moteur : 7	42 (Scénario ClimPol)

Le graphique suivant illustre tant la comparaison des hypothèses des émissions carbone en ACV du véhicule électrique que les évolutions attendues à différents horizons temporels.

Figure n° 8 : Évaluation de l'ACV (en g CO<sub>2</sub> e./veh.km) d'un véhicule électrique dans différentes études et à divers horizons temporels (hors intensité du contenu carbone de l'électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes)



Sur la base du graphique ci-dessus, nous avons pu dresser une fourchette des ordres de grandeur des émissions carbone en ACV du véhicule électrique (hors intensité du contenu carbone de l'électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) pour chaque année de référence. Ces hypothèses sont les suivantes :

- **2020** : Les émissions carbone en ACV du véhicule électrique sont comprises **dans un intervalle entre 46,7 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (IFP Energies Nouvelles pour un véhicule du segment C, 2019) **et 93,91 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (Mobitool, 2020).
- **2030** : Les émissions carbone en ACV du véhicule électrique sont comprises **dans un intervalle entre 38 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (Message, 2021) **et 75,4 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (IFP Energies Nouvelles pour un véhicule électrique « plus » haut de gamme du segment D<sup>5</sup>, 2019).
- **2040-2050** : Les émissions carbone en ACV du véhicule électrique sont comprises **dans un intervalle entre 29,1 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (Message, M., 2021) **et 43,6 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (CGEDD & France Stratégie, 2022).

Afin de disposer d'une estimation totale de l'ACV du véhicule électrique à ces différentes années de référence, l'ensemble de ces hypothèses ont été reprises dans le dernier chapitre de ce rapport auxquelles ont été ajoutées tant les émissions carbone ayant trait à la construction et à l'entretien des routes que les fourchettes construites du contenu carbone de l'électricité (cf. chapitre 3).

<sup>5</sup> Comparativement aux véhicules du même segment, les véhicules électriques « plus » sont équipés d'une batterie plus importante ce qui leur confère une autonomie accrue.

---

Selon **Daniel Schaller**, spécialiste en efficacité énergétique des transports à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), la variabilité conséquente des résultats de l'ACV partielle du véhicule électrique estimés en 2020 dans les études s'explique avant tout par les référentiels utilisés pour produire ces projections. Il soulève qu'en fonction des caractéristiques retenues dans l'évaluation de l'ACV du véhicule électrique, telles que son poids, son autonomie, sa durée de vie ou encore les matériaux qui composent sa batterie, des variations majeures peuvent être induites.

### **Vers un « verdissement » du véhicule électrique**

Les experts sollicités lors du webinaire s'accordent unanimement sur la réduction à moyen et long terme des émissions carbone en ACV du véhicule électrique. Plusieurs constats récents ou avancées technologiques à venir fondent leur raisonnement :

- Des études parues très récemment portant sur l'ACV du véhicule électrique convergent vers une amélioration notoire de leurs gains d'efficacité énergétique ;
- La masse de la batterie influençant à ce jour significativement les émissions carbone globales évolue vers une baisse significative grâce à de nouveaux alliages de matériaux qui la composent ;
- La recherche en cours sur l'allongement de l'autonomie, principal frein actuel à l'achat pour bon nombre d'utilisateurs potentiels, et la durée de vie du véhicule électrique progresse considérablement et est porteuse de bonnes perspectives ;
- L'implantation annoncée de plusieurs Gigafactory en Europe, spécialisées dans la chaîne de montage de la batterie, permettra de décarboner massivement la production des batteries compte tenu du fait que la part du renouvelable dans le mix énergétique des pays européens est amenée à croître ces prochaines années conformément aux accords de Paris.

### 3. L'intensité carbone de l'énergie

L'**intensité carbone de l'énergie** est la cinquième et dernière variable de l'équation de Kaya. Elle s'exprime en grammes CO<sub>2</sub> équivalent par kilowattheure (g CO<sub>2</sub>eq./kWh). En cohérence avec le choix de focaliser sur les technologies électriques les analyses relatives à l'efficacité des véhicules, **on se concentrera ici sur l'intensité carbone de l'électricité** (valeur actuelle et évolution à 2030 et 2050), en vue notamment d'établir des comparaisons avec les carburants fossiles, dont on considère que le contenu carbone n'évoluera pas dans le temps.

Afin d'éclairer les économies d'émissions de GES liées à cette variable d'intensité carbone de l'électricité, on s'intéressera successivement ici à la situation actuelle dans le but de proposer une valeur de référence pour le Grand Genève (3.1) puis aux évolutions possibles de cette variable, à 2030 et 2040-2050 (3.2).

#### Synthèse des principaux messages

- **Pour la situation actuelle**, la valeur moyenne annuelle à considérer pour l'intensité carbone du kWh électrique consommé sur le territoire du Grand Genève est de **120 g CO<sub>2</sub>eq./kWh**, soit un facteur de réduction de 2,75 par rapport à l'intensité carbone moyenne des carburants fossiles pour voitures (de l'ordre de 330 g CO<sub>2</sub>eq./kWh). Cette valeur correspond à un alignement vers le haut des données disponibles pour la France et la Suisse. Ce choix se justifie par le constat de différences méthodologiques entre les modes de calcul adoptés dans l'un et l'autre pays au sujet de l'impact carbone du kWh consommé.
- **Pour l'évolution future** de cette intensité carbone moyenne de l'électricité, on considérera les fourchettes suivantes :
  - o **2030 : entre 100 et 120 g CO<sub>2</sub>eq./kWh**
  - o **2040-50 : entre 60 et 100 g CO<sub>2</sub>eq./kWh**
- Relativement hautes en comparaison avec les valeurs proposées dans les récentes études de prospective énergétique française (« Transitions 2050 » de l'ADEME) et suisse (« Perspectives énergétiques 2050+ » de l'OFEN), ces fourchettes tiennent compte de la réalité des trajectoires actuelles de nos sociétés (fortement divergentes vis-à-vis de l'objectif de neutralité carbone), ainsi que plus globalement de fortes incertitudes qui pèsent sur l'évolution des variables les plus déterminantes pour l'évolution de cette intensité (évolution des consommations et du mix d'approvisionnement en électricité, transformation des filières principalement étrangères de production des technologies renouvelables, augmentation tendancielle de la demande d'électricité dans plusieurs domaines pour sortir du fossile, etc.).
- Ces valeurs moyennes annuelles d'intensité carbone de l'électricité doivent être mises en perspective par rapport aux fluctuations horaires des émissions, liées à la nature des unités de production activées en fonction de l'ampleur de la demande. Du point de vue de la mobilité

électrique, le moment de la recharge constitue donc un critère déterminant pour l'impact carbone du déplacement / du véhicule. Compte tenu de l'augmentation prévue des quantités d'électricité consommées pour la mobilité électrique (ainsi que de la part de cet usage dans les consommations électriques totales), la durée de la recharge du véhicule (et donc la demande de puissance associée) devra aussi être considérée afin de réduire la contribution de la mobilité aux pics de demande d'électricité.

### 3.1. Situation actuelle

#### a) Données considérées

Les données considérées sont issues des bases de données « carbone » nationales : base carbone ADEME<sup>6</sup> en France, KBOB<sup>7</sup> en Suisse.

Parmi les différentes valeurs proposées dans ces bases de données, on prend comme référence pour l'intensité carbone de l'électricité le **mix consommateur** national. Celui-ci permet de rendre compte, en moyenne annualisée, de l'impact carbone du kilowattheure consommé, en tenant compte des importations et exportations d'énergie effectuées par chaque pays (« production nationale + importations - exportations »), mais sans intégrer les éventuels certificats d'origine achetés par les fournisseurs locaux d'électricité (déconnectés des flux physiques réels, ces derniers ne donnent pas une vision réaliste des efforts à accomplir pour atteindre la neutralité carbone à un niveau global).

#### b) Comparaison des valeurs nationales d'intensité carbone du kWh électrique consommé

Selon les bases de données nationales, **l'intensité carbone du mix consommateur actuel** pour l'énergie électrique s'élève, en moyenne annuelle, à :

- **59,9 g CO2 eq./kWh** pour la France (valeur base carbone ADEME pour 2020)
- **125 g CO2 eq./kWh** pour la Suisse (valeur KBOB 2022)

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans la détermination de cette intensité carbone et peuvent contribuer à expliquer la différence constatée entre les valeurs françaises et suisses. Il s'agit en particulier :

- de la composition du mix électrique, respectivement de la part des importations et de la manière de les comptabiliser ;
- des hypothèses d'intensité carbone relatives aux différentes sources de production d'électricité composant le mix consommateur de chaque pays.

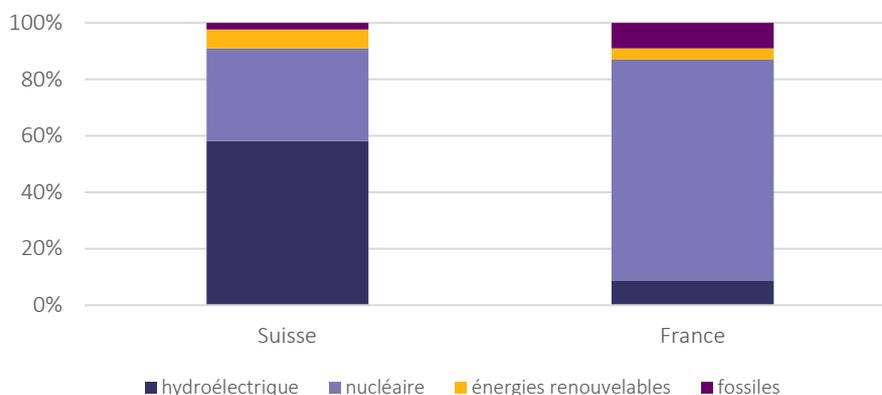
<sup>6</sup> Base Carbone ADEME : <https://bilans-ges.ADEME.fr/fr/accueil>

<sup>7</sup> KBOB / Ecobau, 2022. Données d'écobilans dans la construction : <https://www.ecobau.ch/fr/instruments/donnees-des-ecobilans>

### Composition du mix électrique et comptabilisation des importations

La Suisse comme la France se caractérisent par des mix nationaux de production peu carbonés, car majoritairement basés sur le nucléaire pour la première et sur l'hydroélectricité pour la seconde.

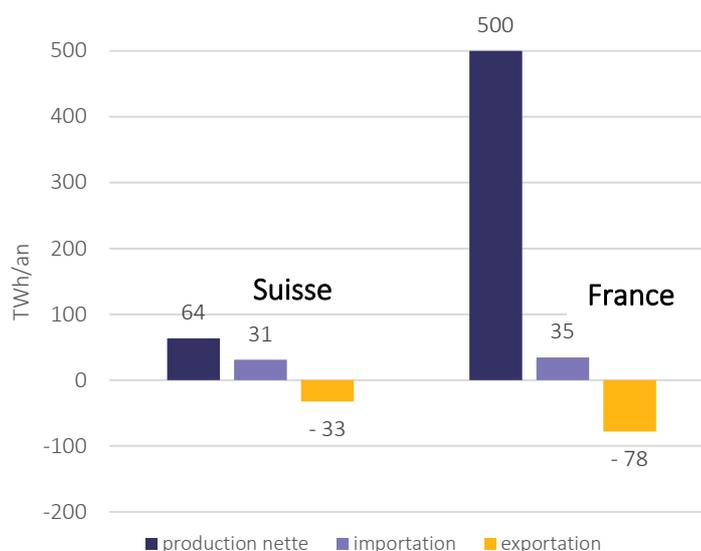
Figure n° 9 : Composition du mix de production électrique 2020, pour la Suisse et la France



Source : RTE (2021) ; OFEN (2021)

Parallèlement aux productions nationales, il est nécessaire de considérer les importations et exportations d'électricité. De ce point de vue, les deux pays présentent des profils très différents. Alors qu'importations et exportations représentent respectivement 7% et 16% de la production annuelle d'électricité française 2020, ces pourcentages s'élèvent à 49% et 51% pour la Suisse<sup>8</sup>, dont la production est environ 8 fois moins importante qu'en France. A noter que le déclin du parc nucléaire contribue, depuis 2018, à une hausse notable des importations françaises (qui en 2021 atteignent 44 TWh soit une augmentation de 70% par rapport à 2018).

Figure n° 10 : Production, importation et exportation d'électricité en 2020 pour la Suisse et la France



Source : RTE (2020) ; OFEN (2020)

<sup>8</sup> En raison de sa position centrale en Europe, la Suisse assume en effet « une importante fonction de plaque tournante dans le système électrique européen » (OFEN, 2020).

Du point de vue de l'impact carbone, les importations jouent un rôle clé car elles interviennent principalement lors des pics de demande d'électricité, donc précisément aux moments où il est nécessaire d'activer des unités de production supplémentaires, tendanciellement plus carbonées que la moyenne. Méthodologiquement, la manière de comptabiliser ces importations, respectivement d'en évaluer l'intensité carbone (moyenne horaire ou moyenne annuelle), aura donc une influence importante sur l'intensité moyenne du mix consommateur. Or, après vérification auprès des fournisseurs de données, il s'avère que les approches suisses et françaises sont sur ce point différentes :

- **Pour la France**, le facteur d'intensité carbone du « mix moyen » consommateur fourni par la Base carbone de l'ADEME prend en compte le pays d'origine des importations en fonction de l'évolution heure par heure de ces importations. En revanche, le facteur d'intensité carbone affecté à ces importations n'est pas indexé sur une base horaire mais se réfère au mix de production *annuel* moyen des pays importateurs.
- **Pour la Suisse**, le facteur d'intensité carbone du « mix consommateur » KBOB intègre également les variations horaires des importations, pour en déterminer l'origine mais aussi pour en déterminer l'intensité carbone. En d'autres termes, le facteur d'intensité carbone des importations tient compte de l'heure à laquelle elles interviennent et donc de la nature des unités de production activées à ce moment par le pays importateur.

Bien que les importations représentent, en France, une proportion des consommations totales d'électricité plus réduite qu'en Suisse, l'application d'une comptabilisation horaire de l'intensité carbone des importations impliquerait très probablement une augmentation de l'impact carbone du kilowattheure consommé.

#### *Hypothèses relatives à l'intensité carbone des différentes sources de production d'électricité*

Parallèlement aux enjeux méthodologiques liés à la manière de comptabiliser les importations, **on constate que les hypothèses relatives à l'intensité carbone de certains vecteurs de production d'électricité divergent entre la France et la Suisse**. Bien que les bases de données KBOB et ADEME soient toutes deux appuyées sur des analyses de cycle de vie par filière, les valeurs proposées par la seconde se révèlent en effet nettement moins élevées pour un certain nombre de filières, en particulier le nucléaire et l'hydroélectrique, qui constituent la base des mix français et suisse.

Tableau 3 : *Hypothèses d'intensité carbone des différents vecteurs de production électrique en g CO<sub>2</sub>eq/kWh, en Suisse et en France, valeurs 2020 (sources : KBOB-Ecobau (2022) ; Base carbone ADEME)*

	KBOB	ADEME
Nucléaire	24	6
Hydraulique	12 à 169*	6
Solaire	48	44
Biomasse	233	230
Eolien	19	14
Géothermie	31	45
Gaz	230	227
Mazout	324	324
<i>*centrale à accumulation</i>		

---

De même que pour la comptabilisation des importations, l'application au mix consommateur français des facteurs d'émission KBOB impliquerait une augmentation non négligeable de l'intensité carbone de ce mix.

c) Proposition d'un facteur de référence « Grand Genève » et comparaison avec l'intensité carbone des carburants fossiles

Les différences méthodologiques constatées entre la Suisse et la France, sur la manière de comptabiliser les importations d'électricité et sur les hypothèses relatives à l'intensité carbone des différentes sources de production d'électricité, conduisent à proposer un alignement « vers le haut » du facteur d'intensité carbone du kWh électrique « consommateur » pour le Grand Genève. Le fait que les valeurs KBOB / EcoBau aient déjà été adoptées comme référence pour le Plan climat genevois et, consécutivement, pour toutes les politiques genevoises qui en déclinent les mesures est un autre argument favorable à un tel alignement.

Sur la base de ces différents constats, on proposera une valeur actuelle moyenne de référence de **120 g CO<sub>2</sub>eq./kWh électrique consommé sur le territoire du Grand Genève**. L'intensité carbone de l'essence pour voiture étant estimée à 330g CO<sub>2</sub>e/kWh (338g CO<sub>2</sub>e/kWh selon valeur KBOB 2022, 311g CO<sub>2</sub>e/kWh selon base carbone ADEME), on constate que le rapport est aujourd'hui de l'ordre de 2,75 vis-à-vis du « carburant » électrique.

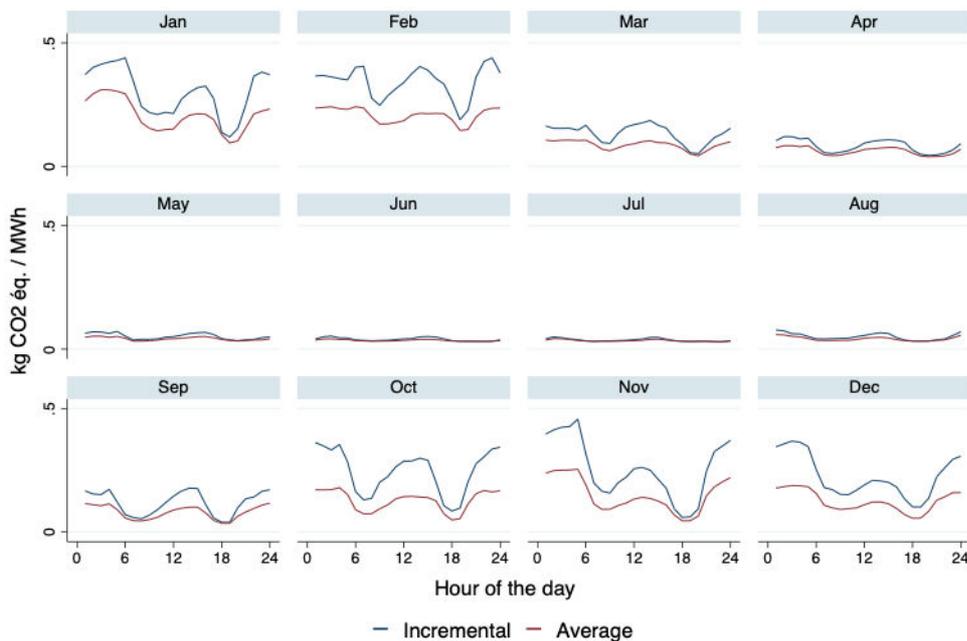
d) Précautions relatives à l'utilisation d'une valeur moyenne annuelle d'intensité carbone par kWh

La valeur d'intensité carbone proposée ci-dessus pour le Grand Genève correspond à une moyenne annuelle. Or, comme cela a déjà été mentionné au sujet du contenu carbone des importations, cette valeur moyenne doit être mise en perspective par rapport à des valeurs instantanées susceptibles de varier de manière importante en fonction de la courbe de charge (ampleur de la demande de puissance électrique à un moment donné). L'électricité ne pouvant être stockée à grande échelle, la satisfaction des pics de demande peut en effet nécessiter l'activation d'unités de production potentiellement très carbonées (à l'étranger pour les importations, mais aussi sur les territoires français et suisses). À titre d'exemple, pour la Suisse, l'augmentation de l'intensité carbone du kWh électrique peut actuellement dépasser un facteur 5 entre la moyenne annuelle et les pointes de demande (pic supérieur à 600 g CO<sub>2</sub>eq./kWh)<sup>9</sup>. **Lors de ces pics de demande électrique, fréquents et réguliers en période hivernale, l'intensité carbone de l'électricité est donc équivalente à au moins deux fois celle de l'essence. Du point de vue de la mobilité électrique, le moment de la recharge constitue donc un critère déterminant pour l'impact carbone « réel » du déplacement et donc du véhicule.**

---

<sup>9</sup> Rüdüsüli M., Romano E., Eggimann S., Patel M.K. (2022). Decarbonization strategies for Switzerland considering embedded greenhouse gas emissions in electricity imports. Energy Policy 162.

Figure n° 11 : Contenu CO2 de l'électricité Suisse, valeurs mensuelles et courbes journalières pour la période 2017-2022, selon la méthode « moyenne » et la méthode « incrémentale »<sup>10</sup>.



Source : UNIGE (2022)

### 3.2. Projections à 2030 et 2050

#### a) Des projections soumises à de fortes incertitudes

Projeter l'évolution à 2030 et 2050 de l'intensité carbone du kWh électrique est un exercice complexe dans lequel il s'agit d'intégrer de nombreuses variables, relatives en particulier :

- **à la consommation d'électricité et plus généralement d'énergie:** quelle ampleur et quelle structure de la demande future d'électricité (courbe de charge) ? Quels effets de report des énergies fossiles vers l'électricité, dans les secteurs du bâtiment et de la mobilité notamment ?
- **à l'approvisionnement en électricité :** quels choix technologiques et quels rythmes d'investissements pour quelle évolution des mix nationaux de production d'électricité en France, en Suisse et plus globalement en Europe (considérant que les importations continueront de jouer un rôle crucial pour les décennies à venir, au moins en Suisse) ? Quels impacts des changements climatiques sur les filières de productions (notamment hydroélectrique et nucléaire<sup>11</sup>) ?

<sup>10</sup> La prise en compte du contenu carbone des importations suisses heure par heure, telle que précédemment décrite au point b) (par opposition à la moyenne annuelle utilisée en France) peut se décliner à travers des modalités de calcul différentes :

- la méthode « moyenne » appliquée par la Confédération (EcoBau, KBOB), considère, pour chaque heure, le contenu carbone *moyen* du kWh produit par le pays d'où provient l'importation ;
- la méthode « incrémentale » développée par l'UNIGE (voir notamment Romano et al., 2018) considère les émissions associées aux unités de production *supplémentaires* que les pays auprès desquels la Suisse importe doivent activer pour répondre à la demande suisse. Cette seconde méthode aboutit logiquement à des valeurs d'intensité carbone plus élevées pour les importations suisses d'électricité.

<sup>11</sup> On s'attend notamment à des problèmes de refroidissement des centrales nucléaires du fait des diminutions de débit des fleuves, à des changements des profils saisonniers de production hydroélectrique du fait du moindre enneigement et de la fonte des glaciers, et en même temps à des besoins accrus de stockage d'eau pour la boisson ou l'arrosage.

- 
- **aux filières d'extraction et de transformation des matières premières pour la production des technologies et infrastructures liées à l'approvisionnement énergétique** : quel rythme de décarbonation de l'économie dans les pays producteurs pour quelles évolutions au niveau, en particulier, des émissions grises associées au nucléaire et aux énergies renouvelables ?

Les possibilités d'influer localement sur ces variables sont très inégales. Si l'on dispose, au niveau du Grand Genève, de leviers relativement importants pour infléchir la consommation, les évolutions relatives à l'approvisionnement renvoient davantage à des choix de niveau national / fédéral, voire européen, tandis que les filières de production des matériaux et technologies, aujourd'hui essentiellement extra européennes, peuvent être considérées comme hors de portée des décisions locales.

L'évolution de ces différentes variables est par ailleurs soumise à de multiples tendances de long terme comme à des événements « ponctuels » dont les effets sont très difficiles à anticiper. En attestent les changements dans les stratégies d'approvisionnement énergétique induits par la récente guerre russo-ukrainienne ou, à une autre échelle temporelle, les travaux engagés au sujet des impacts des changements climatiques sur la production électrique, en particulier pour les filières nucléaire et hydraulique qui prédominent dans les mix français et suisse actuels.

Face à cette complexité, il apparaît nécessaire, dans le cadre de la présente réflexion :

- de considérer l'évolution future de l'intensité carbone de l'électricité en termes de fourchettes, à 2030 et à 2040-2050 ;
- de s'appuyer sur les exercices de prospective énergétique récemment réalisés ou mis à jour pour la France (ADEME, 2022a et 2022b ; RTE, 2022) et la Suisse (OFEN, 2020 et 2021 ; Innosuisse, 2021), travaux dans le cadre desquels les variables précitées ont été analysées de manière détaillée.

#### b) La décarbonation de l'électricité au sein des scénarii énergétiques français et suisses

Pour la France, les scénarii « Transitions 2050 » de l'ADEME (ADEME 2022a et 2022b) et, pour la Suisse, les scénarii « Perspectives 2050+ » (OFEN, 2020 et 2021a) ont été adoptés comme les principales références pour la présente réflexion (voir tableau ci-dessous pour l'ensemble des sources consultées). Commandités par les gouvernements français et suisse dans le but de guider la définition de leurs politiques énergétiques respectives, ces exercices prospectifs sont basés sur une analyse détaillée de l'évolution des différentes variables précitées. Dans le cadre de la présente réflexion, l'interprétation des résultats proposés par ces scénarii au sujet de l'électricité doit tenir compte des précautions méthodologiques suivantes :

- **Les scénarii établis dans le cadre de ces études ont une forte dimension normative.** En cohérence avec les engagements politiques pris, en Suisse comme en France, pour atteindre la neutralité carbone à 2050, ils ont ainsi été construits dans le but d'explorer différents scénarii pouvant nous mener à cette neutralité (scénarii S1 à S4 dans la prospective ADEME, scénario « zéro base » et ses variantes dans les Perspectives énergétiques 2050+), en comparaison avec un scénario tendanciel correspondant au prolongement des dynamiques de long terme observées dans le passé (scénario « TEND » dans la prospective ADEME), ainsi qu'au maintien des mesures de politique publique telles qu'elles existent actuellement (scénario « PPA » dans les Perspectives énergétiques 2050+).

- Ces études ont été réalisées avant le déclenchement de la guerre russo-ukrainienne, et ne prennent donc pas en considération les enjeux qui en découlent, notamment vis-à-vis de l’approvisionnement en gaz jusqu’alors considéré comme une énergie de transition.
- Les logiques de construction des scénarii français et suisse ne sont pas analogues. Ainsi, les scénarii prospectifs de l’ADEME se basent en premier lieu sur des hypothèses d’évolution de la société et des modes de vie, tandis que les différents scénarii de neutralité de l’étude 2050+ (zéro base et variantes) ont été prioritairement établis en fonction de choix technologiques structurants pour le système énergétique (en particulier plus ou moins grande électrification de ce dernier). Il convient donc de considérer avec prudence la comparaison de leurs résultats, le but étant ici principalement de dégager des ordres de grandeur communs.

Tableau 4 : Synthèse des études énergétiques prospectives considérées pour la France et la Suisse (en gras les scénarii nationaux considérés comme principalement référence)

Pays	Source	Horizon	Nature des informations fournies
France	ADEME, 2022a. Transition(s) 2050 choisir maintenant agir pour le climat.	2050	Scénarii énergétiques à 2050 (« Transitions 2050 ») : 4 scénarii normatifs orientés vers la neutralité carbone et basés sur des trajectoires socio-économiques types (sobriété, coopération, technologies vertes, poursuite de la consommation de masse et pari « réparateur »), et un scénario tendanciel (poursuite des tendances de long terme)
	ADEME (2022b). Transition(s) 2050. Feuilleton “mix électrique”. Quelles alternatives et quels points communs ?	2050	Déclinaison des scénarii énergétiques « Transitions 2050 » sous l’angle spécifique de la consommation et de l’approvisionnement en électricité
	RTE (2022). Futurs énergétiques 2050.	2050	Scénarii normatifs d’évolution du mix électrique français à 2050 pour atteindre la neutralité carbone (différents mix d’approvisionnement qui se différencient du point de vue de la part du nucléaire et du renouvelable, en intégrant les besoins d’infrastructure pour le stockage / déphasage ; une trajectoire de consommation de référence avec une variante « sobriété »)
Suisse	OFEN (2020). Perspectives énergétiques 2050+. Rapport succinct OFEN (2021a). Energieperspektiven 2050+ Technischer Bericht. Gesamtdokumentation der Arbeiten (rapport technique et tableaux de données)	2050	Scénarii d’évolution du mix énergétique suisse à 2050, incluant 4 scénarii normatifs « neutralité carbone » et un scénario tendanciel (poursuite de la politique énergétique actuelle)
	Confédération Suisse – Innosuisse (2021). Transformation of the Swiss Energy System for a Net-Zero Greenhouse Gas Emission Society.	2050	Analyse approfondie des mix d’approvisionnement et choix technologiques nécessaires à la décarbonation du système électrique suisse à 2050.
	Rüdisüli et al., 2022. Decarbonization strategies for Switzerland considering embedded greenhouse gas emissions in electricity imports. Energy Policy 162	2050	Projection sur l’intensité carbone horaire du kWh électrique suisse à 2050, en considérant l’augmentation des besoins électriques liés aux pompes à chaleur et à la mobilité, ainsi que différents mix d’approvisionnement (production locale et importation).

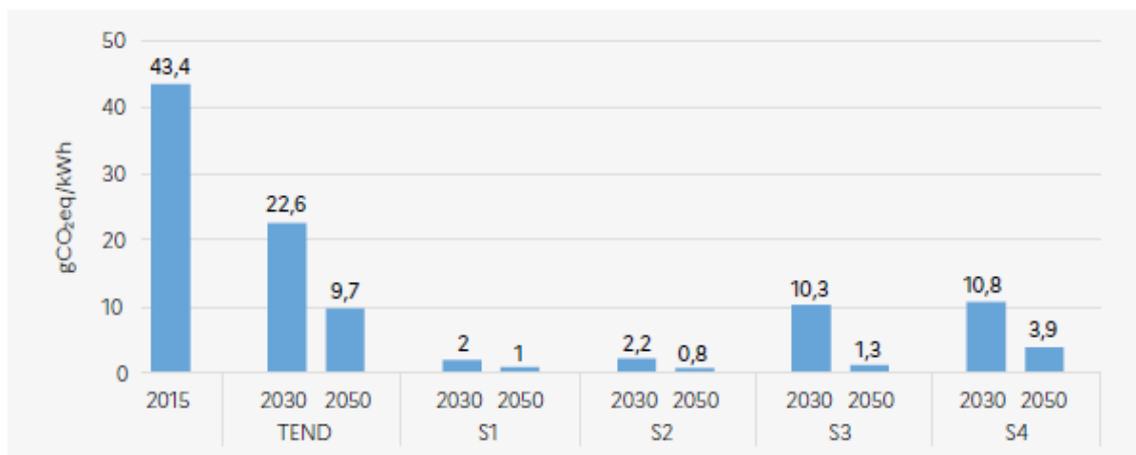
Les données fournies par les prospectives énergétiques françaises et suisses au sujet de l’évolution de l’intensité carbone de l’électricité sont difficilement comparables car établies selon des logiques de réflexion très différentes (I). Il est donc intéressant de considérer les tendances plus générales qui vont influencer sur l’évolution de cette intensité carbone, en matière d’évolution de la demande (II) et du mix d’approvisionnement en électricité (III).

### I. Perspectives relatives à l'évolution de l'intensité carbone de l'électricité

Pour la France, l'étude « Transitions 2050 » de l'ADEME fournit des données sur les perspectives d'évolution de l'intensité carbone de l'électricité à 2050. Si les scénarii normatifs « neutralité carbone » tendent logiquement vers des valeurs très basses, on constate également de fortes diminutions prévues pour le scénario tendanciel (de l'ordre de 50% à 2030, 75% à 2050 par rapport à 2015).

Ces valeurs doivent néanmoins être considérées avec précaution. D'une part, la valeur de référence mentionnée pour 2015 (43,4 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) est sensiblement inférieure au « mix consommateur moyen » fourni par la Base carbone de l'ADEME pour cette année-là (60,9 gCO<sub>2</sub>eq/kWh soit 40% de plus). D'autre part, on peut supposer que les différences méthodologiques précédemment pointées entre les méthodes française et suisse de calcul de l'intensité actuelle du kWh électrique influent également sur les projections effectuées (voir section 3.1 ci-dessus).

Figure n° 12 : Evolution du facteur d'émission moyen du kWh électrique pour 2030 et 2050, selon les différents scénarii de l'étude ADEME Transitions 2050



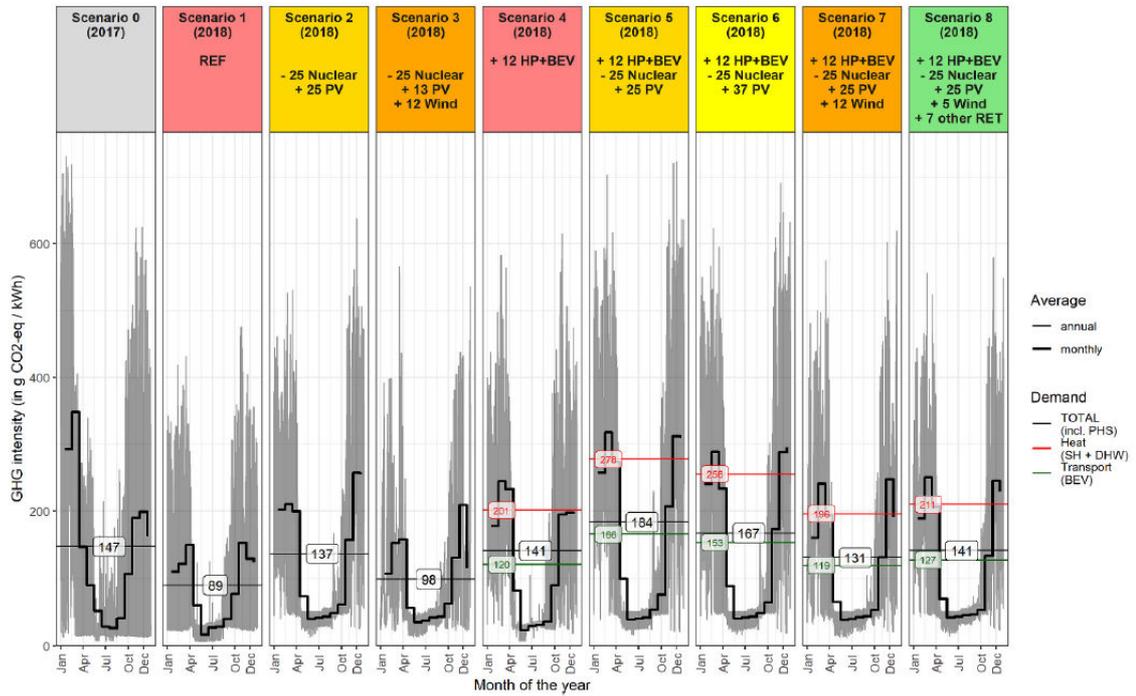
Source : ADEME 2022a, p.658

Pour la Suisse, l'intensité carbone future de l'électricité n'est pas renseignée en tant que telle dans les Perspectives 2050+ mais elle a récemment été étudiée par Rüdüsüli et Al. (2022) pour différents scénarii<sup>12</sup> croisant des hypothèses relatives à l'évolution de la demande (notamment augmentation des besoins pour les pompes à chaleur et la mobilité par rapport à l'année de référence 2018) et du mix d'approvisionnement (part respective du nucléaire, du solaire PV, de l'éolien et des autres énergies renouvelables) à l'horizon 2050.

Comme le montrent les figures 12 et 13 ci-dessous, ces projections, non normatives, aboutissent à des valeurs d'intensité carbone de l'électricité demeurant en 2050 du même ordre de grandeur qu'actuellement. Si l'intensité carbone des importations est, selon ces scénarii, appelée à diminuer, celle de la production nationale tendrait en revanche à augmenter, du fait de l'évolution de la part des différentes filières dans ce mix de production (voir point III ci-après).

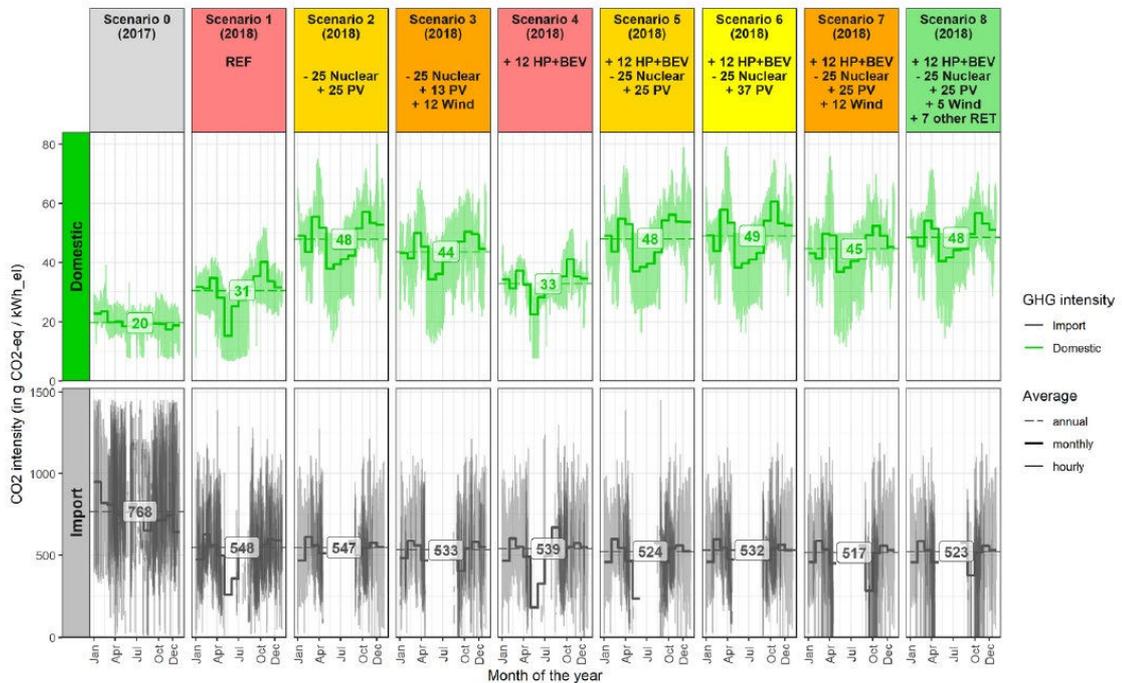
<sup>12</sup> Pour le détail sur la composition de ces scénarii, voir Rüdüsüli M., Romano E., Eggimann S., Patel M.K. (2022), p.5.

Figure n° 13 : Projection à 2050 relative à l'intensité carbone moyenne (horaire, mensuelle, annuelle) de l'électricité consommée en Suisse (production domestique et importation) selon différents scénarii<sup>13</sup>



Source : Ibid, 2022

Figure n° 14 : Projection à 2050 relative à l'intensité carbone moyenne (horaire, mensuelle, annuelle) de l'électricité produite sur le territoire suisse et de l'électricité importée, selon différents scénarii<sup>14</sup>



Source : Rüdisüli et Al. (2022)

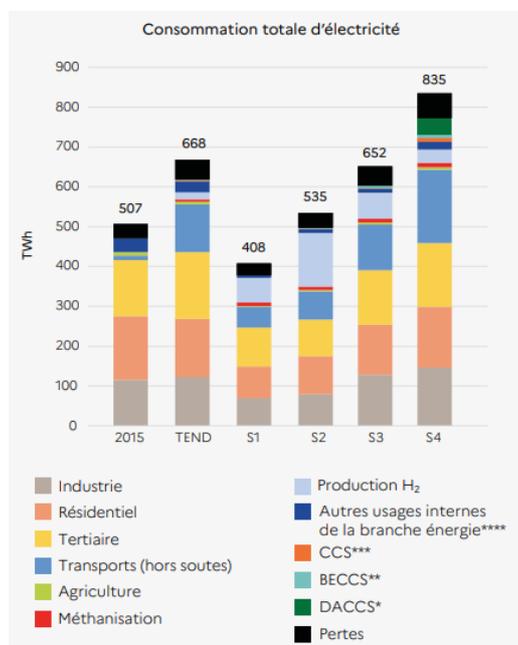
<sup>13</sup> Pour le détail sur la composition de ces scénarii, voir Rüdisüli M., Romano E., Eggimann S., Patel M.K. (2022), p.5.

<sup>14</sup> Ibid, p.5

## II. Perspectives relatives à l'évolution de la demande en électricité

Côté français comme côté suisse, tous les scénarii se traduisent par une **augmentation de la demande d'électricité en 2050 par rapport à la situation actuelle**, à l'exception du scénario S1 de l'ADEME qui intègre des hypothèses très fortes de sobriété. Pour les scénarii tendanciels, cette augmentation est estimée entre 10% (scénario PPA suisse) et 30% (scénario TEND pour la France). Pour les scénarii normatifs « neutralité », l'augmentation varie fortement, de +6% pour le scénario suisse comprenant la plus faible électrification jusqu'à +65% pour le scénario « pari réparateur » de l'ADEME, basé sur l'hypothèse d'une sauvegarde de la consommation de masse (S4 dans la figure ci-dessous). Cohérente avec les effets de report, déjà sensibles, des vecteurs fossiles vers l'électricité, cette augmentation de la demande globale en électricité constitue un défi supplémentaire pour la décarbonation de ce vecteur, à court et moyen terme en tous cas.

Figure n° 15 : Consommation totale d'électricité de la France en 2050 selon les différents scénarii de l'étude ADEME Transitions 2050 (intégrant la branche énergie, les secteurs, les puits technologiques et le CCS)



\*DACCS : direct air carbon capture and storage

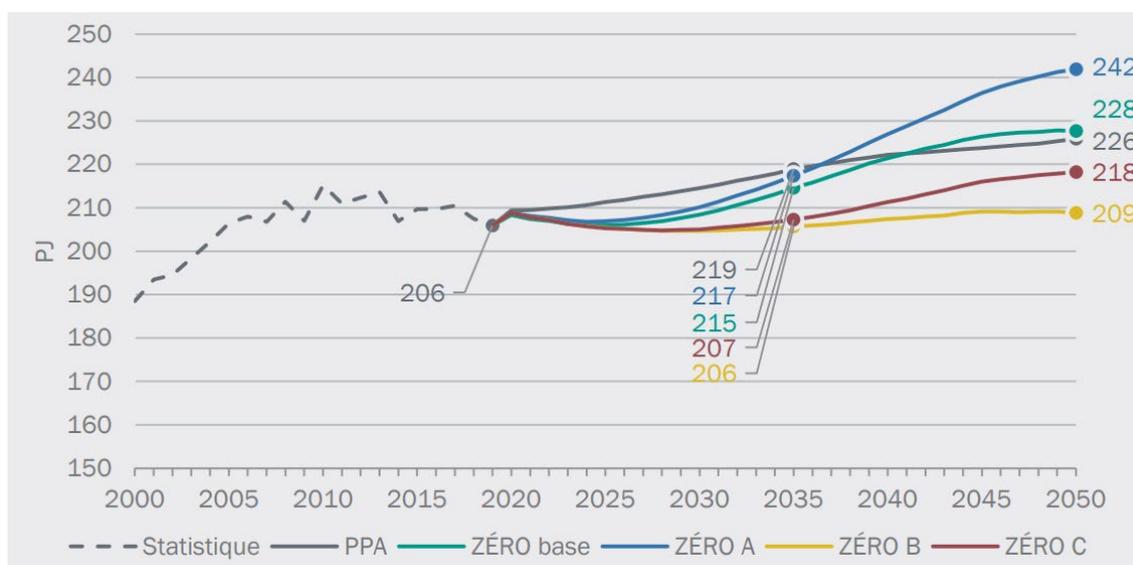
\*\* BECCS : bioenergy with carbon capture and storage

\*\*\*CCS : carbone capture and storage

\*\*\*\*l'autre usage interne de la branche énergie comprend des consommations d'électricité pour l'enrichissement de l'uranium, l'autoconsommation des centrales thermiques et des stations de transfert d'énergie par pompage.

Source : ADEME 2022a, p.651

Figure n° 16 : Evolution de la consommation finale d'électricité de la Suisse entre 2000 et 2050 selon les différents scénarii de la stratégie 2050+



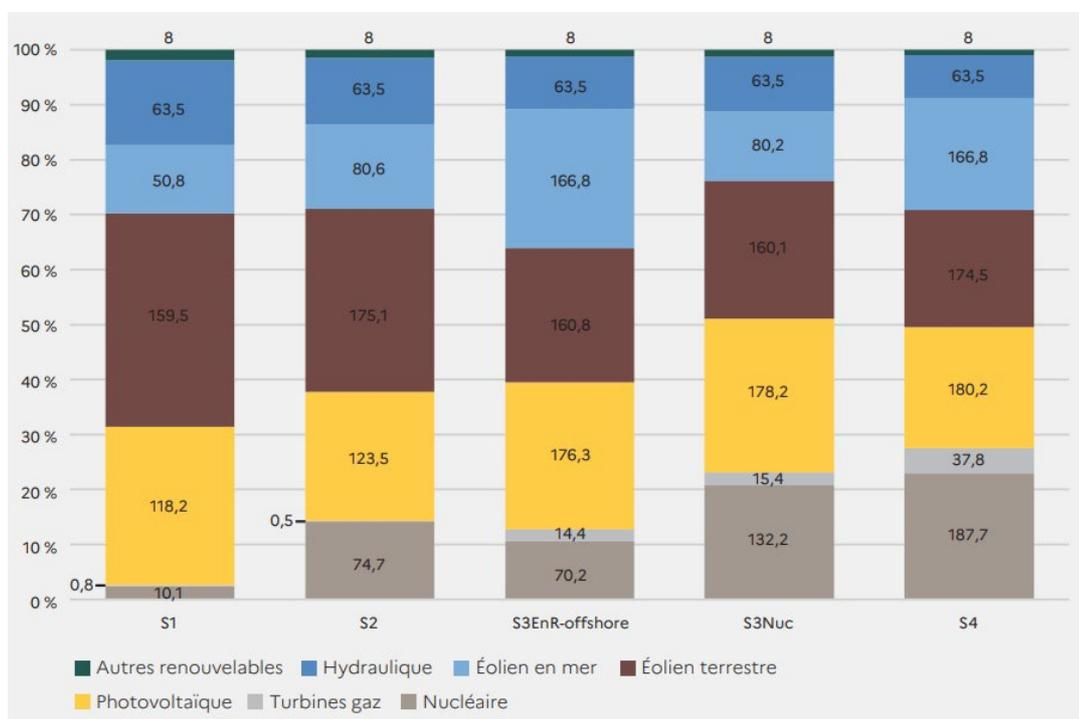
Source : OFEN (2020), p.49.D'après Prognos AG / TEP Energy GmbH / INFRAS AG 2020

### III. Perspectives relatives à l'évolution du mix d'alimentation électrique

**Du point de vue des productions nationales, l'évolution des filières aujourd'hui prédominantes en France et en Suisse est sujette à différentes incertitudes.** Celles-ci ont notamment à voir avec le vieillissement des infrastructures (en particulier parc nucléaire), les atteintes environnementales qui doivent être considérées dans les pesées d'intérêts relatives aux investissements énergétiques futurs (déchets nucléaires, impacts des barrages sur les écosystèmes, etc.), mais également les impacts que pourraient avoir les changements climatiques sur ces filières (problèmes de refroidissement des centrales nucléaires du fait des diminutions de débit des fleuves, changement des profils saisonniers de production hydroélectrique du fait du moindre enneigement et de la fonte des glaciers, besoin accru de stockage d'eau pour la boisson ou l'arrosage, etc.).

**L'évolution du mix de production d'électricité est donc largement basée, en France comme Suisse, par une augmentation forte des énergies renouvelables.** Du fait de la prise en compte des émissions « grises » liées aux matériaux utilisés tout au long de chacune des filières de production d'électricité, les facteurs d'intensité carbone des filières renouvelables n'apparaissent toutefois pas meilleurs que ceux associés aux filières nucléaire et hydroélectrique (cf. Tableau 3 à la section 3.1). Cette augmentation de la part de renouvelables dans le mix ne se traduira donc pas de facto par une diminution de l'intensité carbone du kWh.

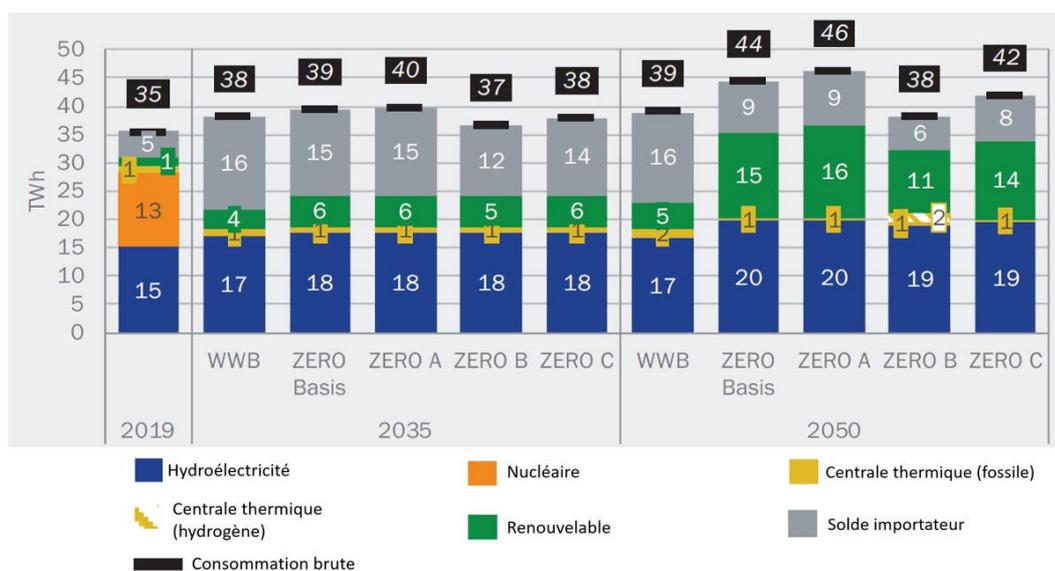
Figure n° 17 : Projections pour la France : évolution du mix de production en électricité à 2050 selon les différents scénarii « Transitions 2050 »



Source : ADEME (2022b), p.39.

Par ailleurs, l'évolution des importations demeure, en particulier pour la Suisse, un paramètre clé pour l'approvisionnement électrique futur, respectivement pour l'intensité carbone de cet approvisionnement. Côté suisse, Tous les scénarii établis dans le cadre des Perspectives énergétiques 2050+ prévoient en effet le maintien d'une part non négligeable d'énergie importée dans le mix d'approvisionnement 2050, et a fortiori dans celui de 2030 (cf. Fig. 18 ci-dessous).

Figure n° 18 : Projections pour la Suisse : évolution de la structure de production d'électricité à 2035 et 2050 selon les différents scénarii de la stratégie 2050+



Source : OFEN (2021), p.342. D'après Prognos AG / TEP Energy GmbH / INFRAS AG 2021

---

Pour la France, les projections effectuées par l'ADEME considèrent que, pour l'électricité, le solde import/export annuel demeure positif tout au long de la période considérée (2020-2050)<sup>15</sup>. Compte tenu de l'évolution relative au parc nucléaire, et plus globalement des enjeux liés à la coordination temporelle entre fournitures et demande d'électricité, ce solde annuel n'exclut toutefois pas des besoins d'importation pour satisfaire certains pics de demande. Or, comme précédemment indiqué, les kWh importés à ces moments-là sont, pour les prochaines années en tout cas, susceptibles d'être particulièrement carbonés.

### c) Hypothèses d'intensité carbone à 2030 et 2040-2050 pour la mobilité électrique

Considérant les différents éléments qui viennent d'être présentés, les experts sollicités dans le cadre du webinaire organisé dans le cadre de la présente étude ont convergé autour de la nécessité de demeurer prudents quant aux possibilités de réduction de l'intensité carbone du mix électrique suisse et français, en particulier à 2030, mais également à 2050. Les valeurs suivantes ont ainsi été proposées comme référence pour l'évolution de l'intensité carbone de l'électricité au niveau du Grand Genève :

- 2030 : entre 100 et 120 g CO<sub>2</sub>eq./kWh
- 2040-50 : entre 60 et 100 g CO<sub>2</sub>eq./kWh

Rappelons que les incertitudes qui demeurent au sujet de notre capacité à transformer rapidement les infrastructures de production d'électricité, mais également à faire évoluer de manière importante et rapide la structure de la demande incitent à **la plus grande prudence sur l'usage des valeurs relatives à l'évolution à long terme de l'intensité carbone du kWh électrique**. Au regard des tendances actuelles, **on ne peut par ailleurs pas exclure que se posent, dans les prochaines années, des problématiques de disponibilité absolue de l'électricité (ruptures d'approvisionnement) face auxquelles les usages devraient être priorités**.

Rappelons également que les valeurs proposées ci-dessus demeurent des moyennes annuelles qui ne retranscrivent pas les pics d'émissions horaires variables selon la nature du mix de production « instantané ». **Il est ainsi essentiel, en complément aux projections globales sur l'impact carbone de la mobilité électrique, de mettre l'accent sur les enjeux liés au moment où intervient la recharge**. La durée de cette recharge, indissociable de la puissance requise par les bornes de recharge des véhicules, pourrait également devenir déterminante à l'avenir, dans un contexte où les consommations électriques dédiées à la mobilité vont augmenter, en valeur absolue comme en proportion des consommations totales (voir ci-après section 4.2).

---

<sup>15</sup> Voir ADEME (2022a), p.659.

## 4. Quelles interactions et hypothèses de ces deux variables pour le Grand Genève ?

### 4.1. Intégration de l'intensité carbone dans l'évaluation de l'ACV des véhicules électriques

Il nous a paru nécessaire à ce stade, dans l'optique de disposer d'une ACV totale d'un véhicule électrique telle que normalement évaluée dans la littérature, d'intégrer dans les différentes hypothèses construites de l'empreinte carbone de ce type de véhicules (cf. point 2.3) les émissions carbone relatives à la construction et à l'entretien des routes. Ces dernières ont été estimées, pour un véhicule électrique, à 16,65 g CO<sub>2</sub> e./veh.km en 2020 et 2030 et 8,75 g CO<sub>2</sub> e./veh.km en 2040-2050.

Le tableau suivant récapitule les valeurs découlant de l'intégration du facteur d'intensité carbone de l'électricité (WTT) dans les données plus globales d'analyse de cycle de vie des véhicules présentés plus haut. Pour convertir les quantités de CO<sub>2</sub> jusque-là exprimées par kilowattheure en quantités de CO<sub>2</sub> par kilomètre, un facteur de 0.17 a été appliqué en référence à l'efficacité moyenne des véhicules actuels<sup>16</sup>. Nous avons conservé ce facteur dans les diverses projections, partant du postulat qu'il devait rester identique pour identifier les effets nets sur les autres variables « toutes choses égales par ailleurs ».

Tableau 5 : Intégration des hypothèses relatives à l'intensité carbone future de l'électricité dans l'analyse globale de cycle de vie du véhicule électrique à différents horizons temporels

	ACV d'un véhicule électrique en g CO <sub>2</sub> e./veh.km (hors facteur électricité)	ACV moyenne d'un véhicule électrique (hors facteur d'électricité)	ACV moyenne d'un véhicule électrique avec la construction des routes (hors facteur d'électricité)	ACV totale d'un véhicule électrique en g CO <sub>2</sub> e./veh.km (avec facteur électricité et construction des routes) <sup>17</sup>	Intensité carbone de l'électricité g CO <sub>2</sub> e./kWh	Émissions électricité en g CO <sub>2</sub> e./veh.km (avec application du facteur de 0,17)	Part de l'intensité carbone de l'électricité dans les émissions moyennes en ACV	Facteur d'amélioration du rapport entre l'ACV moyenne d'un véhicule thermique vendu en 2020 <sup>18</sup> et l'ACV totale estimée du véhicule électrique
Actuel (2020)	46,7 à 93,9	67	83	Entre 83,3 (fourchette basse) et 130,5 (fourchette haute)	120	20	19%	2
2030	38 à 75,4	50,8	66,4	Entre 71,6 et 74,6 (fourchette basse) et entre 109,1 et 112,1 (fourchette haute)	100 à 120	17 à 20	18 à 24%	Entre 2,3 et 2,4
2040-2050	29,1 et 43,6	35,8	44,5	Entre 47,8 et 54,8 (fourchette basse) et entre 62,4 et 69,4 (fourchette haute)	60 à 100	10 à 17	21 à 34%	Entre 3,8 et 4,2

<sup>16</sup> Valeur issue de l'outil Mobitool (2018).

<sup>17</sup> La valeur de la construction des routes a été ajoutée dans l'estimation des fourchettes de l'ACV d'un véhicule électrique afin de disposer d'une ACV totale à différents horizons temporels. Elle a été évaluée à 16,65 g CO<sub>2</sub> e./veh.km en 2020 et 2030 (Mobitool, 2018) et à 8,75 g CO<sub>2</sub> e./veh.km en 2040-2050 (Suisse énergie, 2020).

<sup>18</sup> Les émissions moyennes en ACV d'un véhicule thermique (essence et diesel) en 2020 ont été évaluées à 263,75 g CO<sub>2</sub> e./veh.km selon les estimations de l'Institut Paul Scherrer (2020). Ce chiffre a été utilisé pour calculer, sur la base des fourchettes hautes estimées de l'ACV totale d'un véhicule électrique, le facteur d'amélioration de ce dernier eu égard au véhicule thermique à différents horizons temporels.

---

Les incertitudes relatives aux valeurs futures d'intensité carbone de l'électricité se traduisent logiquement par des variations relativement importantes du poids de ce facteur dans l'impact carbone globale du véhicule à 2030 et 2040-2050. Toutefois, sa part actuelle – autour de 20% - correspond plutôt à la fourchette haute des projections établies pour 2030 et 2040-2050.

L'intégration conjointe tant des fourchettes estimées de l'intensité du carbone de l'électricité évaluées dans le chapitre 2 que des émissions relatives à la construction et à l'entretien des routes ci-dessus, nous permet de dresser un certain nombre d'hypothèses de l'empreinte carbone totale du véhicule électrique en 2030 et 2040-2050 :

- **2030** : des émissions carbone totales en ACV d'un véhicule électrique estimées entre **71,6 et 74,6 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (fourchette basse) et **entre 109,1 et 112,1 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (fourchette haute) ;
- **2040-2050** : des émissions carbone totales en ACV d'un véhicule électrique estimées entre **47,8 et 54,8** (fourchette basse) et entre **62,4 et 69,4 g CO<sub>2</sub> e./veh.km** (fourchette haute).

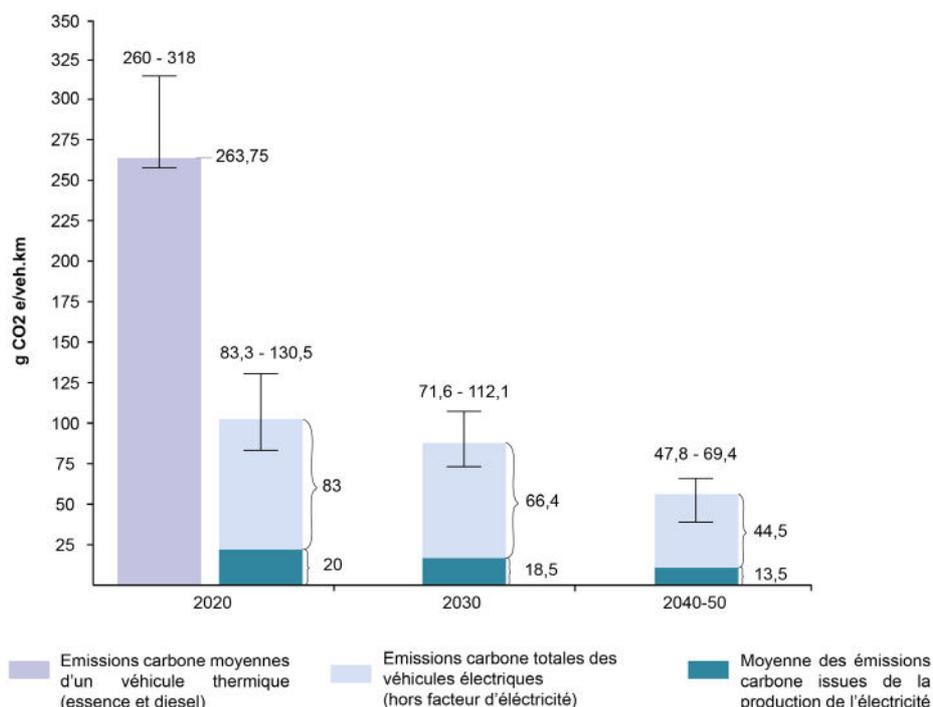
Il nous paraît opportun, compte tenu des incertitudes et des variabilités parfois majeures qui entourent tant les projections de l'intensité carbone de l'électricité que l'ACV des véhicules électriques en 2030 et 2040-2050, de considérer avant tout les valeurs hautes de ces hypothèses pour alimenter la construction de la stratégie multimodale 2050 du Grand Genève.

Si l'on considère la moyenne de chacune des fourchettes hautes ci-dessus, il en ressort que le Grand Genève peut raisonnablement s'attendre pour 2030 et 2040-50 aux ordres de grandeur suivants :

- **2030 : 110 g CO<sub>2</sub> e./veh.km**
- **2040-50 : 67 g CO<sub>2</sub> e./veh.km**

Le graphique ci-dessous rend compte de la décomposition de l'empreinte carbone totale d'un véhicule électrique estimée à différents horizons temporels à partir des hypothèses ayant pu être construites et des fourchettes d'incertitude qui prévalent dans ces projections. **Les grandeurs au-dessus des histogrammes cumulés représentent, selon l'année de référence, l'intervalle des projections de l'ACV totale d'un véhicule électrique qui résulte des valeurs extrêmes entre les fourchettes basses et hautes.**

Figure n° 19 : Décomposition de l'ACV totale d'un véhicule électrique (en g CO2e./veh.km) à différents horizons temporels selon les hypothèses considérées



Comme le démontre le facteur d'amélioration (cf. Tableau 5), rapportant les émissions moyennes en ACV des véhicules thermiques (essence et diesel) vendus en 2020 aux fourchettes hautes retenues de l'ACV totale des véhicules électriques considérés à différents horizons temporels, **les véhicules électriques présentent déjà aujourd'hui une empreinte carbone nettement inférieure à celle des véhicules thermiques.** Si les véhicules électriques émettent à ce jour autour de 2 fois moins de GES que les véhicules thermiques, la différence est d'autant plus significative et notable les décennies ultérieures. **En effet, comparativement au véhicule thermique vendu en 2020 et selon nos hypothèses, le véhicule électrique utilisé en 2030 et 2040-2050 serait respectivement entre 2,3 et 2,4 et entre 3,8 et 4,2 fois moins émetteur de GES que ce premier.**

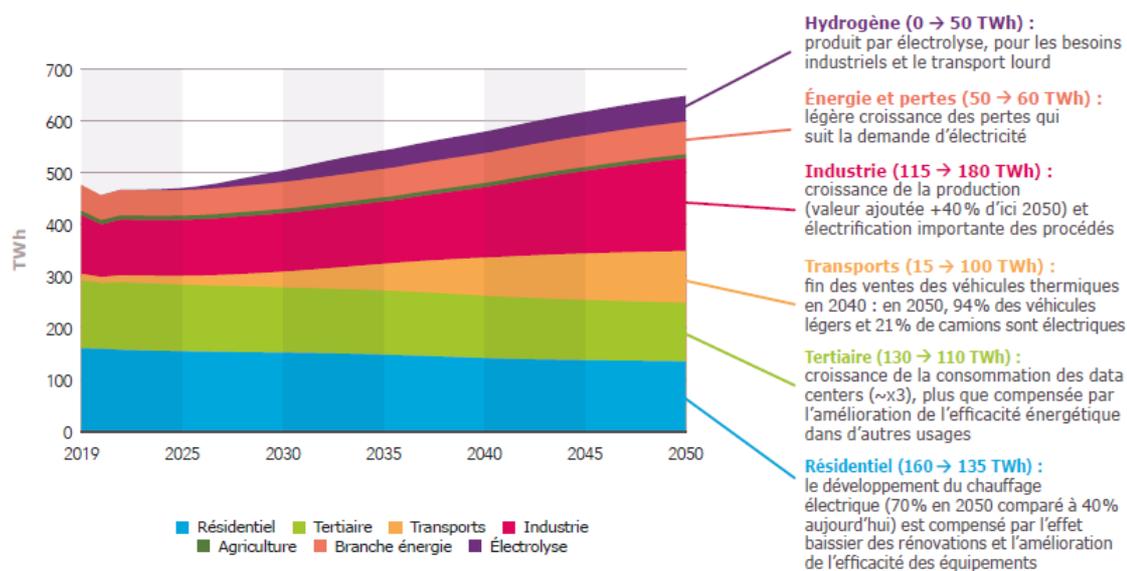
Du point de vue de l'action publique, les marges de manœuvre locales pour agir sur la composante « production » de ce facteur d'intensité carbone étant limitées, **il apparaît essentiel que la politique énergétique, en coordination avec la politique de mobilité, développe des mesures fortes ciblées sur la demande en électricité** (réduction globale des besoins et lissage des points de demande grâce notamment à des mesures de sobriété).

## 4.2. Impacts potentiels de la mobilité électrique sur l'intensité carbone du kWh électrique

La mobilité électrique représente aujourd'hui une part minime des besoins d'électricité nationaux, de l'ordre de quelques pour cent au maximum en Suisse comme en France (1 à 3% selon les bilans nationaux). La perspective d'une électrification massive du parc automobile invite néanmoins à s'interroger sur l'évolution de ce pourcentage dans les prochaines décennies, d'autant plus que la mobilité n'est pas le seul facteur favorable à une augmentation des consommations électriques (pompes à chaleur, numérique, etc. sont autant d'autres usages qui renforcent la pression sur l'approvisionnement électrique).

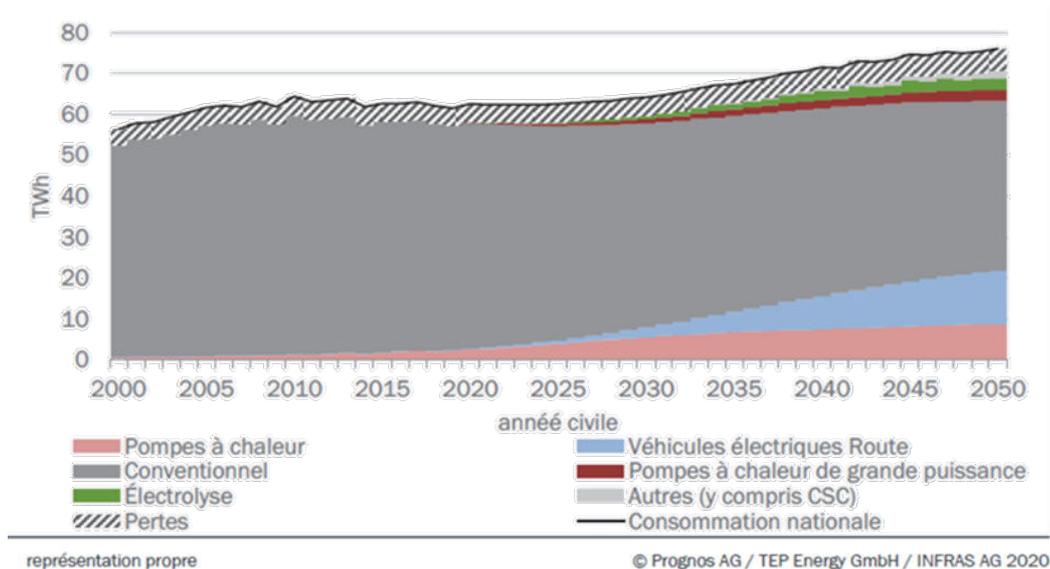
Les projections effectuées dans le cadre des études prospectives au sujet de la part de la mobilité électrique dans la consommation annuelle globale d'électricité des deux pays convergent, à l'horizon 2050, autour de valeurs de l'ordre de 15 %, jusqu'à 20 % pour les hypothèses les plus hautes (RTE, 2022 ; OFEN, 2020 ; Oeko-Institut and Transport & Mobility Leuven, 2016 ; EEA, 2016), considérant bien sûr que ce pourcentage sera dépendant de l'évolution plus globale de la consommation électrique.

Figure n° 20 : Évolution de la consommation totale d'électricité selon la trajectoire de référence établie à 2050 par RTE pour la France, et décomposition sectorielle



Source : RTE (2022)

Figure n° 21 : Évolution de la consommation totale d'électricité selon le scénario ZERO base établie à 2050 par la Confédération pour la Suisse, et décomposition sectorielle



Source : OFEN (2020)

Les impacts possibles de cette demande d'énergie pour la mobilité électrique sur l'intensité carbone du kilowattheure vont en grande partie dépendre :

- du moment où intervient cette demande (plus ou moins en phase avec, d'une part, les pointes de demande liées aux autres usages et, d'autre part, les pics de production liés notamment aux énergies renouvelables) ;
- de la puissance requise pour la recharge, elle-même directement liée au temps nécessaire pour la recharge (plus il est court, plus la puissance requise est importante).

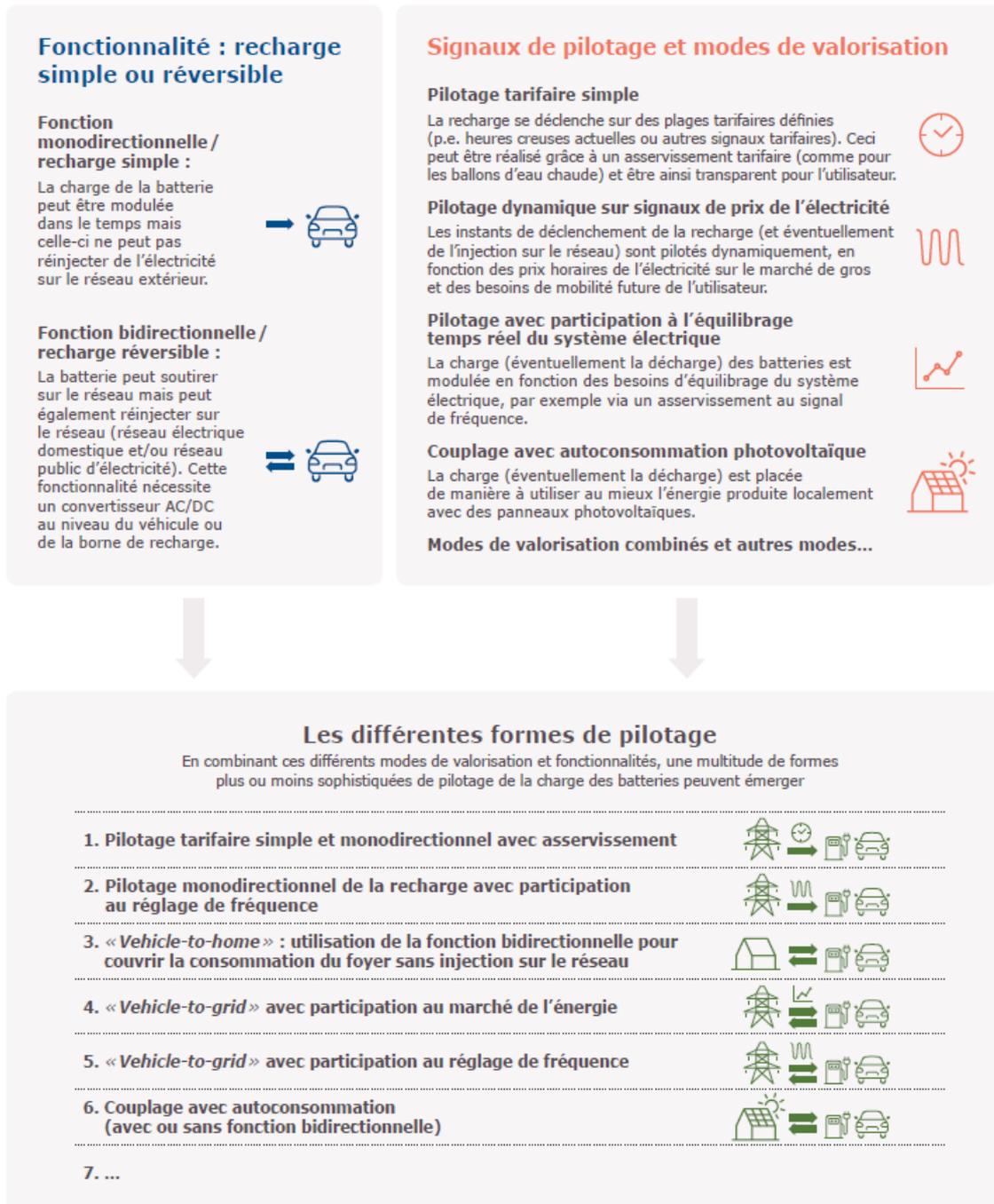
Bien que la quantification de cet impact soit particulièrement complexe - puisqu'elle nécessite de croiser des projections intégrant les variations heure par heure de la demande comme de l'approvisionnement électrique futur – **il apparaît dès aujourd'hui essentiel de prévoir un encadrement minimal, si ce n'est un véritable « pilotage » par les pouvoirs publics des stratégies de recharge.**

**Le but premier est de limiter les impacts de la mobilité électrique sur les pics d'émissions liés à la production d'électricité**, en s'assurant d'un décalage des recharges par rapport aux pics de demande tels qu'ils existent et peuvent être projetés à court et moyen terme. **Secondairement, le parc de véhicules électriques futur (équipé de batteries aptes à réinjecter sur le réseau) pourrait être considéré comme un outil de déphasage des consommations électriques**, avec néanmoins des effets aujourd'hui considérés comme limités sur les courbes de charges. L'un et l'autre de ces axes de travail nécessitent des réflexions préalables autant au niveau des choix technologiques (pour les véhicules à favoriser, la conception des infrastructures de recharges publiques et privées, etc.) que des stratégies de tarification de l'électricité. Les profils types de recharge proposés par Rüdüsüli et Al., 2019 (« travail, domicile, public, autre ») ainsi que les enjeux posés dans le rapport établi sur ce sujet par RTE en 2019<sup>19</sup> pourront, le cas échéant, servir de base pour

<sup>19</sup> RTE (2019). Enjeux de développement de l'électromobilité pour le système électrique :

approfondir la réflexion au niveau du Grand Genève, sur la base d'une consultation préalable des fournisseurs d'énergie.

Figure n° 22 : Focus sur les différentes formes de pilotage de la recharge des véhicules électriques



Source : RTE (2019), p.15

## 5. Enseignements et conclusion

Le passage en revue de la littérature technique et scientifique des projections de l'efficacité énergétique des véhicules, en particulier celles des véhicules électriques, et de l'intensité du contenu carbone de l'électricité en Suisse et en France ainsi que le webinaire avec des experts a permis de fixer pour ces deux familles de variables des hypothèses sur lesquelles le Grand Genève peut s'appuyer pour alimenter la construction de sa stratégie multimodale 2050. Les principaux enseignements à retenir de cette étude sont les suivants :

- > **Les progrès attendus dans l'efficacité énergétique des véhicules constitueront un facteur déterminant pour décarboner la mobilité des personnes. Il ne suffira cependant pas à lui seul pour atteindre les objectifs extrêmement ambitieux de neutralité carbone** et devra être complété par d'autres leviers, tels que la réduction de la demande de transport (sobriété en nombre et en distance de déplacements), l'accroissement du taux de remplissage des véhicules et l'essor du report modal de la voiture individuelle vers des modes moins carbonés (transports en commun), quasi entièrement décarbonés (vélos) et entièrement décarbonés (marche).
- > D'après l'analyse comparative des leviers technologiques à l'origine de la décarbonation de la mobilité projetée dans bon nombre de scénarii, et corroborée par les experts, **l'électrification du parc de véhicules représentera la composante principale de ces progrès, constitutive de gains majeurs dans la réduction des émissions carbone.** Selon les experts, les innovations technologiques actuelles et à venir dans la recherche entre autres d'un allègement de la batterie et d'une augmentation de l'autonomie du véhicule électrique, de même que l'installation prochaine en Europe de plusieurs grandes entreprises spécialisées dans le montage des batteries, concourront à décarboner davantage les procédés de construction des véhicules électriques et, de fait, à réduire l'empreinte carbone globale de ces derniers.
- > **En considérant les hypothèses les plus prudentes à l'horizon 2030 et 2040-2050, à savoir celles des fourchettes les plus élevées, les émissions carbone en ACV d'un véhicule électrique ont été évaluées entre 109,1 et 112,1 g CO<sub>2</sub> e./veh.km en 2030 et entre 62,4 et 69,4 g CO<sub>2</sub> e./veh.km pour 2040-2050.** Par rapport à la moyenne des émissions d'un véhicule thermique (essence et diesel) vendu en 2020 (263,75 g CO<sub>2</sub> e./veh.km) cela représente **un gain d'efficacité énergétique majeur, d'un facteur minimum 3,8 et maximum 4,2 en 2050 !**

**Ces éléments permettraient d'être un peu plus optimiste que jusqu'à présent** quant à l'atteinte des objectifs de décarbonation grâce aux progrès technologiques. Un facteur de 3 a, en effet, été avancé jusqu'ici par le Grand Genève dans l'éventualité d'un parc de véhicules 100% électrifié et de 2,5 dans le cas où le parc roulant serait électrifié à hauteur de 90% en 2050.

---

Compte tenu des délais très serrés nécessaires pour transformer en profondeur à la fois l'ensemble du parc de véhicules que les infrastructures de production et de transport de l'électricité, **il apparaît primordial de retenir les hypothèses les plus prudentes des émissions carbone évaluées du véhicule électrique en 2030 et 2040-2050.** Cela d'autant que les ressources au travers desquelles cette transformation doit s'opérer subiront une pression croissante et un amenuisement inévitable, en particulier l'approvisionnement en minerais, le tout situé dans des contextes géopolitiques incertains et instables.

Enfin, comme l'ont soulevé bon nombre d'experts, **il est encore une fois à souligner que la technologie seule ne suffira pas à atteindre les objectifs ambitieux de neutralité carbone dans la mobilité en 2050 si elle ne s'accompagne pas d'une politique forte visant la sobriété dans les déplacements des individus et le report modal en faveur de moyens de transport bas-carbone, quasi entièrement décarbonés (vélos) et entièrement décarbonés (marche).**

---

## 6. Bibliographie

- ADEME (2018). Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains.
- ADEME, IFPEN (2018). Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment. Projet E4T.
- ADEME (2022a). Transition(s) 2050 choisir maintenant agir pour le climat.
- ADEME (2022b). Transition(s) 2050. Feuilleton "mix électrique". Quelles alternatives et quels points communs ?
- ARE (2021). Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050.
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles (2018). Développons l'Hydrogène pour l'économie française. Étude prospective.
- ATEE (2014). Le bioGNV : une solution française de mobilité durable. Livre blanc du GNV.
- Bigo, A. (2020). Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.
- Carbone 4 (2014). Étude des 4 trajectoires du DNTE. Une vision pédagogique des 4 trajectoires étudiées dans le cadre du débat national sur la transition énergétique.
- Carbone 4 (2019). Biométhane et climat font-ils bon ménage ?
- Carbone 4 (2020). Transport routier : quelles motorisations alternatives pour le climat ?
- CAS (2011). La voiture de demain : carburants et électricité. Rapport de la mission présidée par Jean Syrota.
- Cerema (2021). Emissions routières des polluants atmosphériques. Courbes et facteurs d'influence.
- CGEDD (2017). Actualisation des analyses sectorielles du rapport du CGEDD n° 008378-01 de février 2013 relatif à la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.
- CGEDD (2017). Actualisation des analyses sectorielles du rapport du CGEDD. Annexe thématique sur les transports.
- Confédération Suisse (2021). Stratégie climatique à long terme de la Suisse.
- Confédération Suisse – Innosuisse (2021). Transformation of the Swiss Energy System for a Net-Zero Greenhouse Gas Emission Society.
- Deloitte et Ballard (2020). Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for Transportation.
- Direction Générale de l'Energie et du Climat (2020). Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat.
- Entreprise pour l'environnement (2019). Zéro Emission nette 2050. Imaginer et construire une France neutre en carbone.
- European Environment Agency (2016). Electric vehicles and the energy sector - impacts on Europe's future emissions. Briefing.

- 
- France Stratégie (2019). Comment faire enfin baisser les émissions des CO2 des voitures ?
- Gonzales Vaya M. (2015). Optimizing the electricity demand of electric vehicles: creating value through flexibility. PhD Thesis, ETH Zürich.
- Grand Genève (2021). Scénarios mobilité pour la transition écologique du Grand Genève : état des lieux et leviers d'actions. Cahier n°16-10.
- ICCT (2018-2019). European vehicle market statistics.
- IEA (2018). World Energy Outlook 2018.
- IEA (2019). The future of Hydrogen.
- IRENA (2017). BioGES for road vehicles. Technology brief.
- JRC (2015). The JRC-EU-TIMES model. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries.
- Kapustin N.O., Grushevenko D.A. (2020) Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. Energy Policy 137
- Küng et al. (2017). Challenges of decarbonizing the Swiss transport system.
- Maneco (2014). Bilan carbone du Grand Genève.
- Ministère de la transition écologique et solidaire (2018). Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique.
- Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). Stratégie nationale bas-carbone.
- MTES (2020). Stratégie nationale bas-carbone. Transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone.
- NégaWatt (2017). Scénario négaWatt 2017-2050. Dossier de synthèse.
- NégaWatt (2022). La transition énergétique au cœur de la transition sociétale.
- OFEN (2020). Perspectives énergétiques 2050+. Rapport succinct.
- OFEN (2021a). Energieperspektiven 2050+ Technischer Bericht. Gesamtdokumentation der Arbeiten
- OFEN (2021b). Statistique globale de l'énergie 2020
- Oeko-Institut and Transport & Mobility Leuven (2016). Electric mobility in Europe — Future impact on the emissions and the energy system.
- OPECST (2019). Fin des véhicules thermiques en 2040 : quels scénarios réalistes ?
- Pattupara, R., Kannan, R. (2016). Alternative low-carbon electricity pathways in Switzerland and its neighbouring countries under a nuclear phase-out scenario. Appl. Energy 172, 152–168
- Ricardo Energy & Environment (2017). Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. Final Report for the International Council on Clean Transportation (ICCT).
- Romano E., Hollmuller P., Patel M. (2018). Émissions horaires de gaz à effet de serre liées à la consommation d'électricité – une approche incrémentale pour une économie ouverte : Le cas de la Suisse. Genève : 2018, 25 p. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:131622>

- 
- Rüdisüli M., Romano E., Eggimann S., Patel M.K. (2022). Decarbonization strategies for Switzerland considering embedded greenhouse gas emissions in electricity imports. *Energy Policy* 162. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522000192>
- Rüdisüli, M., Sinan L. Teske, and Urs Elber (2019). "Impacts of an Increased Substitution of Fossil Energy Carriers with Electricity-Based Technologies on the Swiss Electricity System" *Energies* 12, no. 12: 2399. <https://doi.org/10.3390/en12122399>
- RTE (2021). Bilan électrique 2020
- RTE (2022). Futurs énergétiques 2050.
- RTE (2019). Enjeux de développement de l'électromobiliste pour le système électrique.
- Schneider, D (2020). Carburant de synthèse.
- Searle, S., Malins, C. (2016). Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States.
- Swiss Competence Centers for Energy Research (2019). Perspectives des technologies « Power-to-X » en Suisse. Livre blanc.
- Treeze (2021). Umweltbilanz Strommix Schweiz 2018. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf.download.pdf/Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2018-v2.01.pdf>
- Uhlig, R., Neusel-Lange, N., Zdrallek, M., Friedrich, W., Klöker, P. and Rzeznik, T. (2014). Integration of E-Mobility into Distribution Grids via Innovative Charging Strategies, Wuppertal University; Bilfinger Mauell GmbH; SAG GmbH; WSW Netz GmbH, Rome.

---

## 7. Tables des figures et annexes

### 7.1. Table des figures

Figure n° 1 :	Deux grandeurs à préciser (cf. encadré) .....	3
Figure n° 2 :	Contribution des différentes variables de l'équation de Kaya dans la diminution ou l'augmentation des émissions de GES dans la mobilité des personnes en 2050, selon différents scénarii .....	7
Figure n° 3 :	Analyse comparative du facteur d'efficacité énergétique des véhicules en 2050 dans la mobilité des personnes, selon différents scénarii (réalisation 6-t bureau de recherche) .....	8
Figure n° 4 :	Emissions de CO <sup>2</sup> (en g/km) et d'un véhicule particulier en fonction de la vitesse .....	12
Figure n° 5 :	Analyse comparative du degré d'intensité des leviers de décarbonation en matière d'efficacité énergétique des véhicules et d'intensité carbone de l'énergie dans la mobilité des personnes en 2050, selon différents scénarii .....	14
Figure n° 6 :	Les différents composants du calcul en « Analyse Cycle de Vie » .....	16
Figure n° 7 :	Comparaison des émissions actuelles en ACV (en g CO <sub>2</sub> e./veh.km) d'un véhicule électrique dans les différents pays de l'Union européenne .....	16
Figure n° 8 :	Évaluation de l'ACV (en g CO <sub>2</sub> e./veh.km) d'un véhicule électrique dans différentes études et à divers horizons temporels (hors intensité du contenu carbone de l'électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) .....	19
Figure n° 9 :	Composition du mix de production électrique 2020, pour la Suisse et la France .....	23
Figure n° 10 :	Production, importation et exportation d'électricité en 2020 pour la Suisse et la France .....	23
Figure n° 11 :	Contenu CO <sub>2</sub> de l'électricité Suisse, valeurs mensuelles et courbes journalières pour la période 2017-2022, selon la méthode « moyenne » et la méthode « incrémentale » .....	26
Figure n° 12 :	Evolution du facteur d'émission moyen du kWh électrique pour 2030 et 2050, selon les différents scénarii de l'étude ADEME Transitions 2050 .....	29
Figure n° 13 :	Projection à 2050 relative à l'intensité carbone moyenne (horaire, mensuelle, annuelle) de l'électricité consommée en Suisse (production domestique et importation) selon différents scénarii .....	30
Figure n° 14 :	Projection à 2050 relative à l'intensité carbone moyenne (horaire, mensuelle, annuelle) de l'électricité produite sur le territoire suisse et de l'électricité importée, selon différents scénarii .....	30
Figure n° 15 :	Consommation totale d'électricité de la France en 2050 selon les différents scénarii de l'étude ADEME Transitions 2050 (intégrant la branche énergie, les secteurs, les puits technologiques et le CCS) .....	31
Figure n° 16 :	Evolution de la consommation finale d'électricité de la Suisse entre 2000 et 2050 selon les différents scénarii de la stratégie 2050+ .....	32
Figure n° 17 :	Projections pour la France : évolution du mix de production en électricité à 2050 selon les différents scénarii « Transitions 2050 » .....	33

Figure n° 18 :	Projections pour la Suisse : évolution de la structure de production d'électricité à 2035 et 2050 selon les différents scénarii de la stratégie 2050+.....	33
Figure n° 19 :	Décomposition de l'ACV totale d'un véhicule électrique (en g CO2 e./veh.km) à différents horizons temporels selon les hypothèses considérées.....	37
Figure n° 20 :	Évolution de la consommation totale d'électricité selon la trajectoire de référence établie à 2050 par RTE pour la France , et décomposition sectorielle .....	38
Figure n° 21 :	Évolution de la consommation totale d'électricité selon le scénario ZERO base établie à 2050 par la Confédération pour la Suisse, et décomposition sectorielle.....	39
Figure n° 22 :	Focus sur les différentes formes de pilotage de la recharge des véhicules électriques	40

## 7.2. Table des tableaux

Tableau 1 :	Les scénarii mobilisés dans l'analyse comparative des grandeurs d'efficacité énergétique projetées des véhicules à horizon 2050.....	6
Tableau 2 :	Les hypothèses de l'ACV (en g CO2e./veh.km) d'un véhicule électrique sans la phase d'utilisation et les émissions relatives à la construction et à l'entretien des routes, selon diverses études .....	18
Tableau 3 :	Hypothèses d'intensité carbone des différents vecteurs de production électrique en g CO2eq/kWh, en Suisse et en France, valeurs 2020 (sources : KBOB-Ecobau (2022) ; Base carbone ADEME).....	24
Tableau 4 :	Synthèse des études énergétiques prospectives considérées pour la France et la Suisse (en gras les scénarii nationaux considérés comme principalement référence).....	28
Tableau 5 :	Intégration des hypothèses relatives à l'intensité carbone future de l'électricité dans l'analyse globale de cycle de vie du véhicule électrique à différents horizons temporels .....	35

## 8. Annexes

### Procès-verbal Webinaire - Hypothèses décarbonation de la mobilité - 6 juillet 2022

Nom, Prénom	Institution	e-mail
Munafò, Sébastien Zobe, Fabrice	6-t bureau de recherche	sebastien.munafò@6-t.co fabrice.zobe@6-t.co
Lavallez, Catherine	Territoires & Energies	catherine@territoires-energies.ch
Barque, Mariam Gumy, Damien	DT	mariam.barque@etat.ge.ch damien.gumy@etat.ge.ch
Vetter, Joël	Grand Genève	joel.vetter@etat.ge.ch
Prina, Alexandre	OCT	alexandre.prina@etat.ge.ch
Sacchi, Romain	Institut Paul Scherrer (PSI)	romain.sacchi@psi.ch
Bigo, Aurélien	Institut Louis Bachelier	aurelien.bigo@hotmail.fr
Tutenuit, Claire	Entreprise pour l'environnement (EPE)	ctutenuit@epe-asso.org
Schaller, Daniel	Office fédéral de l'énergie (OFEN)	Daniel.schaller@bfe.admin.ch
Romano, Elliot	Université de Genève (UNIGE)	Elliot.romano@unige.ch
Ruegg, Marcel	Services industriel genevois (SIG)	Marcel.ruegg@sig-ge.ch
Fallous, Camille	Transitec	Camille.fallous@transitec.net

#### Ordre du jour du Webinaire

- 1) Bienvenue et rappel de la démarche
- 2) Tour de table
- 3) Les hypothèses des émissions carbone en ACV du véhicule électrique (hors facteur électricité)
- 4) Les hypothèses de l'intensité du contenu carbone de l'électricité
- 5) Les hypothèses de l'ACV totale du véhicule électrique et perspectives pour la stratégie multimodale 2050 du Grand Genève
- 6) Conclusions

#### 1) Bienvenue et rappel de la démarche

- Joël V. (Grand Genève) : rappel du contexte et des objectifs du mandat en cours (fixer des ordres de grandeur de l'efficacité énergétique des véhicules et de l'intensité carbone de l'énergie pour alimenter la stratégie multimodale 2050 du Grand Genève).

---

## 2) Tour de table

- Chaque intervenant se présente et précise pour quelle institution il travaille.

## 3) Les hypothèses des émissions carbone en ACV du véhicule électrique (hors facteur électricité)

- Fabrice Z. (6-t) : rappel des hypothèses construites des émissions carbone en ACV du véhicule électrique (hors facteur électricité et émissions liées à la construction et à l'entretien des routes) à différents horizons temporels.
- Daniel S. (OFEN) : la variabilité des hypothèses du véhicule électrique en 2020 s'explique par les caractéristiques du véhicule retenues dans son évaluation : poids, autonomie, masse de la batterie, type de véhicule, etc. Il ajoute que les études menées entre 2015 et 2020 n'ont pas toutes été traitées avec le même sérieux, mais que les publications les plus récentes sont, quant à elles, de bien meilleure qualité. Il recommande par ailleurs l'inventaire ecoinvent<sup>20</sup> comme base de calcul dans l'évaluation de l'ACV du véhicule électrique, ce dernier faisant office de référence pour bon nombre d'études.
- Claire T. (EPE) : compte tenu de l'existence d'amplitudes dans les hypothèses construites, en particulier pour 2020, elle propose de travailler en termes de fourchettes ou de considérer une valeur moyenne dans chaque année de référence.
- Elliott R. (UNIGE) : la diminution de la distance moyenne parcourue par les individus permet de réduire les émissions carbone dans la mobilité.
- Romain S. (PSI) : les émissions carbone du véhicule électrique proviennent presque essentiellement de sa construction. Il ajoute que toutes les industries qui participent à sa construction seront amenées à faire des efforts importants pour réduire leurs émissions de GES.
- Daniel S. (OFEN) : les études portant sur les projections de l'ACV du véhicule électrique sont de plus en plus optimistes quant à son « verdissement » et à ses bénéfices sur le plan climatique. Il ajoute que plusieurs éléments témoignent en ce sens : la décarbonation du mix énergétique européen d'ici à 2050, l'implantation prochaine de Gigafactory en Europe spécialisées dans la chaîne de montage des batteries, etc.
- Romain S. (PSI) : le lieu de production de la batterie a un impact mineur dans la variation de l'ACV du véhicule électrique.
- Claire T. (EPE) : tout porte à croire que les futures batteries comporteront moins de matériaux et seront donc davantage décarbonées.
- Romain S. (PSI) : l'électrification des véhicules comporte des effets rebonds (forte demande d'électricité à certaines périodes de la journée, utilisation moins rationnelle de son usage compte tenu du « zéro émission » vendu par les constructeurs automobiles, etc.). Il soulève que des

---

<sup>20</sup> La base de données Ecoinvent est celle sur laquelle sont basées les valeurs KBOB proposées par la Confédération. La fréquence de mise à jour du KBOB étant moindre que celle d'Ecoinvent, on peut cependant observer un décalage sur certaines valeurs entre le KBOB et la dernière version d'Ecoinvent.

---

campagnes de sensibilisation du thermique à l'électrique seraient nécessaires pour mettre en garde les consommateurs sur le coût concret et réel de l'électromobilité pour l'environnement. Il rappelle que les transports en commun émettent dix fois moins de CO<sub>2</sub> que les voitures électriques.

#### 4) Les hypothèses du contenu carbone de l'électricité

- Elliott R. (UNIGE) : il est nécessaire de considérer ces hypothèses à l'aune du contexte actuel. Il rappelle que la Suisse fait présentement face à de grosses incertitudes quant à la sécurité de son approvisionnement électrique, en particulier pour l'hiver 2023, et qu'elle réfléchit, pour pallier un éventuel « blackout » électrique, à remettre en service des centrales à gaz. De ce fait, il affirme que l'estimation du futur mix consommateur suisse est pour l'heure difficile à évaluer. Il ajoute qu'il faudrait donner des signaux de recharge (de l'information) aux détenteurs de voitures électriques quand le contenu carbone de l'électricité est au plus bas afin de minimiser les émissions carbone de ces recharges.
- Claire T. (EPE) : demande si cette étude tient compte des effets du changement climatique sur la production hydroélectrique. Si tel n'est pas le cas, elle stipule qu'il serait intéressant d'aborder cet aspect.
- Elliott R. (UNIGE) : pour les productions hydroélectriques, les effets du changement climatique (fonte accrue de la glace en hiver) seront compensés par des pluies plus intenses le reste de l'année.
- Daniel S. (OFEN) : en Suisse, le changement climatique sera compensé par l'évolution tant du cadre légal que technique. Il rappelle que le mix fournisseur (22,5 g CO<sub>2</sub>eq/kWh) sur lequel est calculé le contenu carbone de l'électricité en Suisse est aujourd'hui nettement moins émetteur de GES que le mix consommateur (125 g CO<sub>2</sub>eq/kWh selon valeurs KBOB 2022) puisque l'électricité est « nettoyée » par les fournisseurs qui achètent des certificats d'origine, avant d'être injectée dans le réseau. Il précise que le mix consommateur fera prochainement foi dans l'évaluation de l'empreinte carbone de l'électricité et aura comme impact, entre autres, le passage de certains véhicules électriques en « catégorie B ».
- Marcel R. (SIG) : pour que les certificats d'origine ne « faussent » pas les valeurs d'impact, il faudrait que les valeurs qui les fondent soient modélisées non pas à l'année, comme c'est le cas actuellement en Suisse, mais à un pas horaire afin de pouvoir donner un signal pertinent pour ajuster au mieux la puissance du réseau électrique, notamment quand les consommateurs rechargeront en même temps leur véhicule électrique.
- Elliott R. (UNIGE) : sans augmentation de la part de l'électricité issue d'énergies renouvelables et sans stockage de l'électricité en hiver, la Suisse sera contrainte d'importer à certaines périodes de l'année de l'électricité pouvant provenir de sources fossiles.
- Romain S. (PSI) : très compliqué de calculer le modèle horaire de la demande future d'électricité du réseau suisse et ce n'est pas l'objectif de la présente étude. Il ajoute que l'ADEME dispose pour la

---

France de scénarios solides et transparents du contenu carbone de l'électricité estimé en 2050. Selon lui, la sortie progressive du nucléaire en Suisse provoquera une augmentation des importations de gaz et impliquera de fait, à moyen terme, une stagnation voire une augmentation du contenu carbone de l'électricité.

- Elliott R. (UNIGE) : le Réseau européen des gestionnaires de réseau(x) de transport d'électricité a récemment mis à jour les projections du mix énergétique européen.
- Romain S. (PSI) : les données du réseau européen des gestionnaires de réseaux ne sont pas utiles dans ce type d'exercice, car elles se réfèrent uniquement à la production de chaque pays (importations non comprises). De plus, depuis 2022, seules de valeurs globales sont fournies, sans possibilité de connaître la composition du mix (données désormais considérées comme confidentielles).
- Daniel S. (OFEN) : il serait pertinent de considérer le mix consommateur évalué par l'OFEN dans les Perspectives énergétiques 2050+ dans la construction des hypothèses du contenu carbone de l'électricité pour la partie suisse du Grand Genève. Selon lui, le mix électrique suisse ne s'améliorera pas significativement à l'avenir.

#### 5) Les hypothèses de l'ACV totale du véhicule électrique et perspectives pour la stratégie multimodale 2050 du Grand Genève

- Aurélien B. (Institut Louis Bachelier) : la sobriété permet d'aller encore plus loin et constitue un complément indispensable pour réduire de façon significative les émissions carbone dans la mobilité. Bien que l'électrification soit un axe majeur pour décarboner la mobilité, il soulève que les réflexions doivent s'élargir au-delà de la technologie : favoriser le covoiturage, inciter au report de la voiture vers d'autres modes de déplacement plus vertueux tels que le ferroviaire, les transports en commun, le vélo, etc. Le 1er scénario de l'ADEME (« Génération frugale »), issu du rapport intitulé « Transition 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat. », estime que le couple « technologie-sobriété » permettrait de réduire d'un facteur de 2,7 les émissions carbone dans la mobilité. Il ajoute que certains véhicules électriques, comme la Renault Twizy, permettent des gains encore plus considérables que la plupart des modèles mis sur le marché actuellement qui suivent les standards « thermiques » (poids important, nombreux composants électroniques, etc.).
- Claire T. (EPE) : il faut faire des choix dans les hypothèses bien qu'elles soient entourées de nombreuses incertitudes. Elle soutient également que d'autres mesures doivent être activées en dehors des seuls progrès technologiques. Elle ajoute que tous les comportements de mobilité qui augmentent la demande en énergie doivent être inversés pour valoriser les bénéfices potentiels de la technologie.
- Daniel S. (OFEN) : compte tenu, notamment, de la prédominance des impacts liés à la fabrication du véhicule dans l'analyse de cycle de vie d'un véhicule électrique, il est préférable de démotoriser totalement une personne plutôt qu'elle passe d'un véhicule thermique à un véhicule électrique. Pour ce faire, il soutient qu'il faut un changement profond des habitudes de mobilité des individus.

- 
- Claire T. (EPE) : du fait des caractéristiques techniques des véhicules électriques actuels et des « contraintes » d'usage qui en découlent, les détenteurs de voitures électriques sont davantage enclins à accepter l'abaissement des vitesses de circulation et à parcourir de moins longues distances (et utiliser davantage le train).
  - Daniel S. (OFEN) : l'interdiction pour les constructeurs automobiles de vendre toute nouvelle voiture thermique dès 2035 impliquera un report sans conteste vers l'électrique. Il indique que la Confédération travaille de concert avec les acteurs immobiliers et économiques pour définir les conditions-cadres (par des subventions, notamment) qui favoriseront l'installation de bornes de recharge tant sur le lieu de résidence que de travail de la population.
  - Romain S. (PSI) : l'Institut Paul Scherrer mène actuellement une étude sur les répercussions de cette interdiction dans la composition du parc automobile européen à différents horizons temporels. Il affirme que s'il n'y a pas plus d'incitations à développer l'électrique, via par exemple une taxation accrue du prix de l'essence, tout porte à croire qu'il y aura encore de nombreux véhicules thermiques qui circuleront en Europe en 2050 (entre 80 et 100 millions selon leurs premières estimations).
  - Daniel S. (OFEN) : il y aura au maximum 5% de véhicules thermiques dans le parc automobile suisse en circulation en 2050. Il soutient qu'un potentiel énorme réside dans le report modal, dans l'intelligence de la mobilité, etc.
  - Elliott R. (UNIGE) : il faut, via des leviers de tarification par exemple, inciter les propriétaires de véhicules à utiliser modérément les bornes de recharge rapides, car elles impliquent d'importantes demandes de puissance qui accroissent la pression sur les réseaux électriques.

## 6) Conclusions

- Joël V. (Grand Genève) : mots de remerciement et de conclusion.