



27 avril 2023

Impact des voitures de tourisme sur l'environnement en fonction des différents systèmes de propulsion

Situation actuelle (2021) et scénarios d'avenir (jusqu'à 2050)

Rapport technique de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)



Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Philipp Hallauer, Doris Ochsner Tanner (OFEV, division Protection de l'air et produits chimiques)

Frank Hayer (OFEV, division Économie et Innovation)

Traduction

Service linguistique de l'OFEV

Référence bibliographique

OFEV 2023 : Impact des voitures de tourisme sur l'environnement en fonction des différents systèmes de propulsion. Situation actuelle (2021) et scénarios d'avenir (jusqu'à 2050). Rapport technique de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Office fédéral de l'environnement, Berne.

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2023

Résumé

L'essentiel en bref

Le présent rapport technique compare l'impact environnemental de différents types de voitures de tourisme sur l'ensemble de leur cycle de vie en fonction de leur système de propulsion. Les calculs se fondent sur des données d'inventaire issues d'écobilans qui ont été actualisées par l'Institut Paul Scherrer en 2022.

Les voitures de tourisme électriques à batterie présentent des émissions de gaz à effet de serre plus faibles, une charge environnementale totale plus basse et une demande d'énergie cumulée plus modeste que les voitures de même catégorie fonctionnant à l'essence, au diesel, au gaz naturel ou à l'hydrogène produit avec des énergies non renouvelables. Seuls les véhicules électriques à pile à combustible génèrent un impact environnemental comparable lorsque l'hydrogène auquel ils ont recours est issu de sources renouvelables.

Indépendamment de leur système de propulsion, les voitures de tourisme petites et légères ont un impact environnemental moins élevé que les voitures grandes et lourdes.

Les scénarios d'avenir considérés, qui sont basés sur les Perspectives énergétiques 2050+ de la Confédération, montrent que ce sont les véhicules électriques à batterie qui offrent le plus grand potentiel en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'impact environnemental global entre 2030 et 2050.

Le présent rapport technique compare l'impact environnemental des voitures de tourisme sur l'ensemble de leur cycle de vie en fonction de leur système de propulsion. L'analyse se base sur des écoinventaires qui ont été actualisés en 2021 et 2022 ou en partie nouvellement établis.

Le rapport commence par décrire les grandes lignes de la méthode de l'écobilan, les bases de données utilisées, la procédure suivie et les hypothèses retenues pour établir les inventaires. Il présente et interprète ensuite les résultats obtenus sur la base des inventaires et les complète avec des analyses de sensibilité. Pour terminer, il décrit les potentiels de développement des véhicules selon deux scénarios d'avenir et indique, pour conclure, comment il est possible d'agir afin de réduire l'impact des voitures de tourisme sur l'environnement.

Les **résultats de la Figure A1** permettent de comparer les atteintes environnementales de véhicules de catégorie moyenne en fonction de leur système de propulsion. Le bilan inclut la construction, l'utilisation, l'entretien et l'élimination du véhicule ainsi que la production de l'agent énergétique et l'infrastructure. Le véhicule électrique à batterie (*Battery Electric Vehicle*, BEV) rechargé avec du courant renouvelable est celui qui porte le moins atteinte à l'environnement. Comparativement à un véhicule à essence, il génère 65 % moins d'émissions de gaz à effet de serre (GES), tandis que son impact environnemental global et sa demande d'énergie cumulée sont inférieurs de respectivement 44 et 32 %.

La charge environnementale d'un BEV rechargé avec le mix d'électricité des consommateurs (ci-après « mix consommateur ») est également plus faible que celle d'un véhicule muni d'un moteur à combustion, mais la différence est moins marquée. Comparé à un véhicule à essence, le BEV génère 55 % moins d'émissions de GES, a un impact environnemental global inférieur de 23 % et une demande d'énergie cumulée plus basse de 5 %.

Les incidences environnementales d'un véhicule électrique à pile à combustible qui fonctionne avec de l'hydrogène issu de sources renouvelables sont comparable avec celles d'un BEV rechargé avec du courant renouvelable. Un véhicule électrique à pile à combustible qui fonctionne avec de l'hydrogène produit avec le mix consommateur génère par contre nettement plus d'émissions de GES que le BEV.

Le véhicule à essence est celui qui génère le plus d'émissions de GES, tandis que le véhicule à pile à combustible qui fonctionne avec de l'hydrogène produit avec le mix consommateur est celui qui a le plus fort impact environnemental global et la demande d'énergie cumulée la plus élevée. La charge environnementale globale de ce véhicule est supérieure de 17 % à celle du véhicule à essence et sa demande d'énergie cumulée est plus élevée de 77 %. Les indicateurs des véhicules à diesel ou à gaz sont tous légèrement inférieurs à ceux du véhicule à essence.

La combinaison d'un moteur à essence et d'un moteur électrique permet de réduire les émissions de GES de 7 % (hybride) à 16 % (hybride rechargeable) ; dans le cas du véhicule hybride rechargeable, la réduction dépend toutefois beaucoup du comportement de recharge. Si l'on considère l'impact environnemental global des véhicules hybrides, on voit que la réduction est plus faible que sur le plan des GES. La demande d'énergie cumulée du véhicule hybride est inférieure de 6 % à celle du véhicule à essence, alors que celle du véhicule hybride rechargeable est légèrement supérieure.

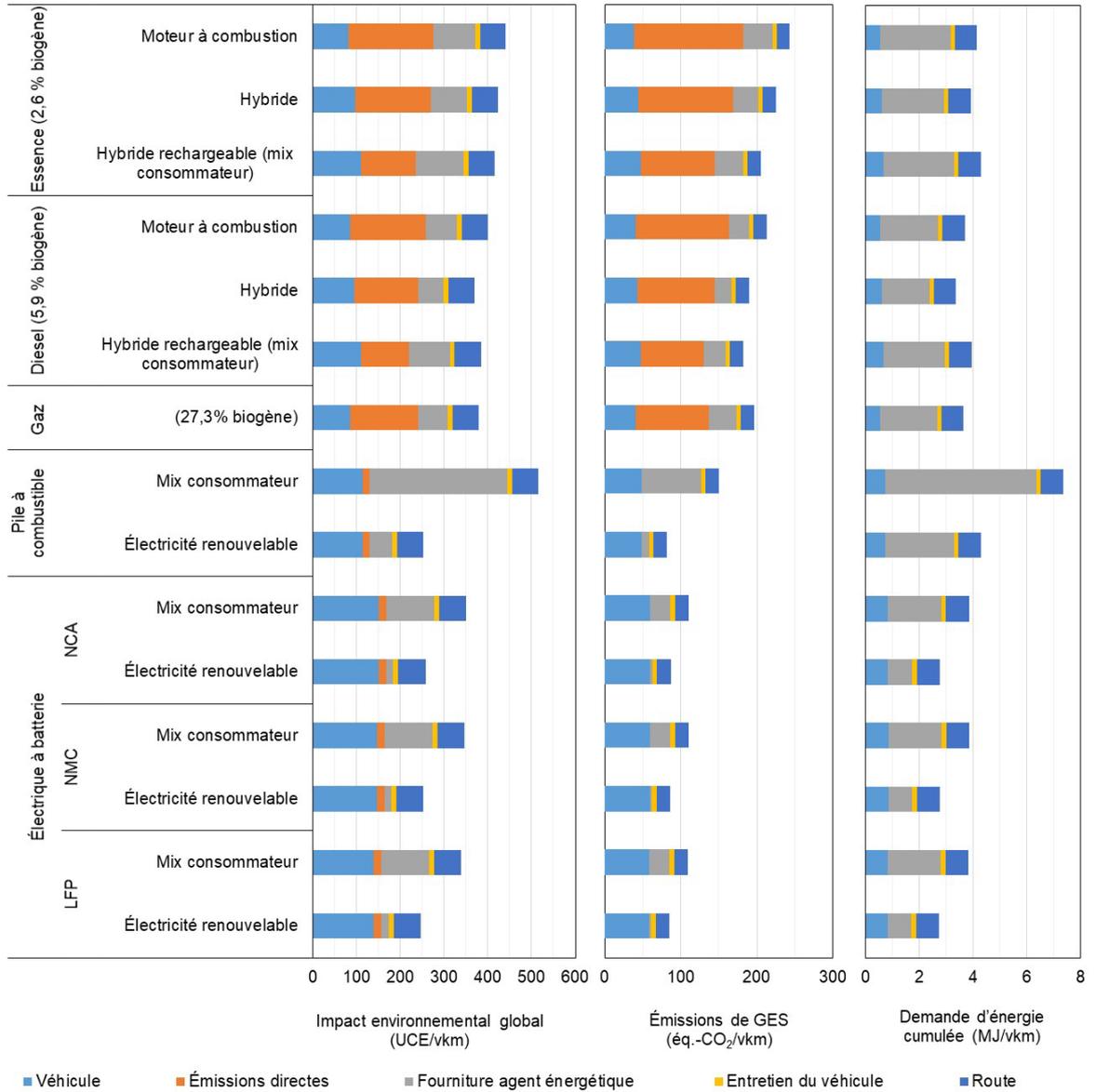


Figure A1 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global (unités de charge écologique [UCE]), les émissions de GES (g d'équivalents CO₂ [ég.-CO₂]) et la demande d'énergie cumulée (méga-joule [MJ]) par véhicule-kilomètre (vkm) d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2, valeurs chiffrées voir tab. 12)

Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)

Remarque : l'impact environnemental de véhicules donnés et un mix électrique individuel peuvent être évalués en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium

NMC : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt

LFP : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-fer-phosphate (LiFePO₄)

Si l'on compare **les voitures de tourisme selon leur taille**, on constate que, quel que soit le type de propulsion, les véhicules plus petits et plus légers portent moins atteinte à l'environnement que les véhicules plus grands et plus lourds. Le plus grand potentiel en matière de réduction des émissions de GES (75 %) est celui qui existe entre le véhicule à essence le plus lourd (catégorie supérieure SUV) et le BEV de catégorie compacte rechargé avec le mix consommateur.

La **comparaison avec les transports publics et les trajets parcourus à vélo** montre que les voitures de tourisme génèrent de loin le plus d'émissions de gaz effet de serre et le plus fort impact environnemental. Sur un trajet de 5 km, un véhicule à essence de catégorie moyenne génère environ six fois plus d'émissions de GES que la moyenne des transports publics et un BEV en génère environ trois fois plus¹. Comparé à un vélo, un véhicule à essence génère 26 fois plus de GES et un BEV, environ 12 fois plus.

Les deux **scénarios d'avenir** considérés, « Poursuite de la politique actuelle » (PPA) et « Zéro émission nette » dans la variante de base (ZÉRO base), s'inspirent des Perspectives énergétiques 2050+ de la Confédération et ont été complétés par des hypothèses concernant le développement technologique des véhicules. L'évaluation de ces scénarios montre que ce sont les véhicules électriques à batterie qui présentent le plus grand potentiel en matière de réduction des émissions de GES entre 2030 et 2050. L'utilisation d'hydrogène ou de carburants synthétiques produits avec les mix électriques prévus pour la période 2030-2050 n'entraîne pas de réduction des émissions de GES et de la charge environnementale globale par rapport aux BEV modélisés pour ces mêmes horizons temporels. Dans les deux scénarios, leur utilisation ne permet pas non plus de réduire les GES par rapport à ceux générés par le BEV de 2021. Lorsque l'énergie de propulsion provient uniquement de sources renouvelables, ce sont les BEV qui génèrent le moins d'émissions de GES et qui ont le plus faible impact environnemental global de tous les modes de propulsions examinés.

Le principal potentiel de réduction supplémentaire pour les BEV réside dans l'allongement de leur **durée de vie kilométrique** et l'utilisation de **batteries plus légères**. La réutilisation des batteries (**seconde vie**) et le **recyclage** accru de celles-ci contribuent aussi à réduire les émissions de GES et l'impact environnemental global, mais dans une mesure moindre. À cet égard, il faut noter que, en plus de la charge environnementale liée à l'extraction et au traitement des matières premières, la disponibilité de celles-ci joue aussi un rôle. La disponibilité des matières premières ne peut pas être approfondie dans ce rapport, mais les processus de recyclage déjà existants sont pris en compte.

L'analyse des résultats montre qu'il existe plusieurs **possibilités de réduire l'impact des voitures de tourisme sur l'environnement**.

Le plus important potentiel de réduction réside dans le choix du moyen de transport ; la comparaison montre en effet que les transports publics et le vélo ont un impact beaucoup plus faible sur l'environnement que les voitures de tourisme. Le choix d'un véhicule équipé d'un système de propulsion électrique permet de sensiblement réduire la charge environnementale au kilomètre par rapport aux autres systèmes de propulsion. Le courant renouvelable et le poids si possible léger du véhicule jouent à cet égard un rôle considérable. Enfin, la recharge fréquente des véhicules hybrides rechargeables, une durée de vie kilométrique aussi longue que possible pour les véhicules électriques à batterie et l'utilisation de matériaux recyclés dans les batteries peuvent aussi contribuer à réduire la charge environnementale.

Les **écoinventaires actualisés** des voitures de tourisme présentés dans ce rapport constituent une base qui peut être utilisée pour d'autres travaux dans le domaine des analyses du cycle de vie.

¹ Voir le tableau Excel disponible sous <http://www.mobitool.ch/>

Table des matières

	Résumé	3
1	Introduction et contexte	9
2	Bases	12
2.1	L'écobilan, une méthode pour analyser l'impact sur l'environnement	12
2.2	Évaluation de l'impact selon la méthode de la saturation écologique	13
2.3	Bases pour le bilan de l'impact environnemental des voitures de tourisme en fonction des différents systèmes de propulsion	14
2.3.1	Base de données utilisée pour l'écobilan	14
2.3.2	Objectif et champ d'étude	15
2.3.3	Évaluation de l'impact	16
2.3.4	Sources de données pour la modélisation des véhicules actuels	16
2.3.5	Véhicules et catégories de véhicule modélisés	17
	Catégorisation des véhicules	17
	Systèmes de propulsion pris en compte	17
	Véhicules modélisés	18
	Énergie de propulsion	19
	Particularité des véhicules hybrides rechargeables	21
2.4	Bases pour les développements techniques potentiels des voitures de tourisme	21
	Sources des données pour la modélisation des futurs véhicules	21
	Limites de la modélisation et incertitudes	23
3	Résultats	24
3.1	Comparaison des différentes technologies de propulsion	24
3.2	Après combien de kilomètres parcourus une propulsion alternative est-elle plus respectueuse de l'environnement qu'un véhicule à essence ?	28
3.3	Influence de la taille du véhicule	30
3.4	Comparaison avec les autres moyens de transport	32
3.5	Potentiels de développement	35
	Influence de l'électricité utilisée pour produire l'énergie de propulsion	37
4	Interprétation des résultats et analyses de sensibilité supplémentaires	39
4.1	Comparaison avec d'autres écobilans de voitures de tourisme	39
4.2	Aspects spécifiques relatifs aux véhicules actuels	41
4.2.1	Influence de la technologie de production de l'électricité utilisée pour fournir l'énergie de propulsion	42
4.2.2	Influence de la part d'utilisation en mode tout électrique pour les PHEV	43
4.3	Influence de la méthode d'évaluation	44
4.4	Aspects spécifiques relatifs aux futurs véhicules	45
5	Conclusions	49
6	Listes	51
	Liste des figures	51
	Liste des tableaux	52
	Bibliographie	54
	Abréviations	56

7	Annexe	57
7.1	Hypothèses utilisées pour les catégories de véhicule	57
7.2	Tableaux des données relatives aux figures.....	58
7.3	Futurs mix électriques	73
7.4	Allocation de l'impact environnemental lors de la fabrication de carburants synthétiques	75

1 Introduction et contexte

Quel impact ont les différents systèmes de propulsion des voitures de tourisme sur l'environnement ? Dans quelle mesure les propulsions alternatives peuvent-elles contribuer à diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) du transport de personnes ? Les voitures électriques actuelles sont-elles, sur l'ensemble de leur cycle de vie, globalement plus respectueuses de l'environnement que les voitures thermiques comparables si l'on tient compte aussi des polluants atmosphériques, du bruit et des autres atteintes ? Quel est l'impact environnemental lié à l'utilisation du véhicule ? Quel est celui imputable à la construction du véhicule ? Et quelles sont les atteintes environnementales dues à la production de l'énergie nécessaire pour alimenter les véhicules ?

L'objectif central du présent rapport technique est de répondre à ces questions. À cet effet, le rapport présente les résultats des inventaires actualisés des voitures de tourisme en fonction des différents systèmes de propulsion. Ce faisant, il répond aussi à la demande formulée dans le postulat 19.3374 « Impact des voitures de tourisme sur l'environnement. Enquêtes modernes et prospectives », déposé par le conseiller national Jürg Grossen.

En 2020, le secteur des transports (sans le trafic aérien international) représentait 32 % des émissions totales de GES de la Suisse (OFEV, 2022). Au sein de ce secteur, le transport routier motorisé de personnes (voitures de tourisme, motocycles, cars privés) génère la plus grande part des émissions (70 %). En 2019, les émissions de GES du transport de personnes étaient supérieures de 7 % à celles de l'année de référence 1990 (valeur de référence : 10,51 millions de t d'équivalents CO₂ [éq.-CO₂]). En conséquence des mesures visant à contenir la pandémie du coronavirus, les émissions ont baissé en 2020 à un niveau correspondant à 92 % de la valeur de référence de 1990. Le nombre de kilomètres parcourus (prestation kilométrique) par les véhicules par année a quant à elle augmenté de 38,5 % entre 1990 et 2019. Cette évolution indique que les émissions moyennes de CO₂ par kilomètre ont considérablement diminué (fig. 1). Dans le domaine du transport de personnes, ce sont les voitures de tourisme qui génèrent de loin le plus d'émissions.

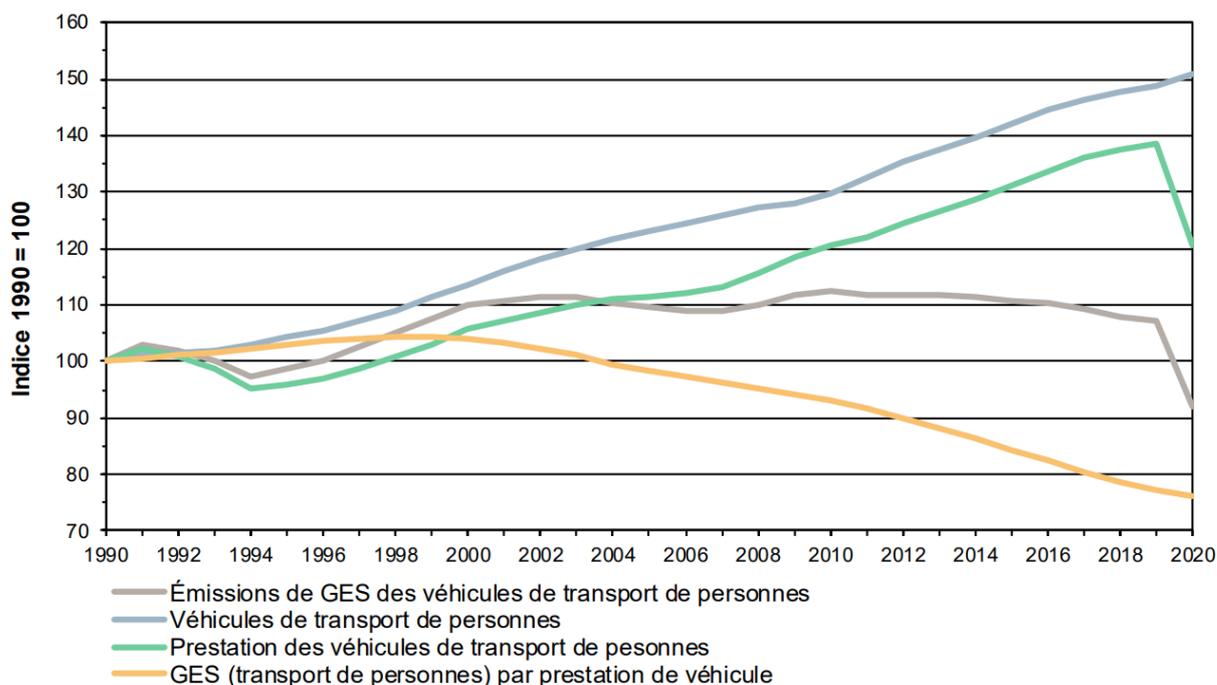


Figure 1 : Évolution des émissions de GES dues au transport de personnes (voitures de tourisme, motos, car privés) depuis 1990, avec les indicateurs pertinents (parc de véhicules et prestation kilométrique des véhicules destinés au transport des personnes [km]). Les émissions de GES par prestation kilométrique des véhicules destinés au transport de personnes sont également indiquées (OFEV, 2022).

Les émissions d'oxydes d'azote (NOx) et de poussières fines (PM), deux polluants atmosphériques, ont diminué ces dernières années grâce à la législation plus sévère sur les gaz d'échappement et aux progrès techniques réalisés dans les systèmes de post-traitement des gaz d'échappement. En 2020, environ 60 % des émissions d'oxydes d'azote en Suisse provenaient cependant des transports, dont presque 60 % des voitures de tourisme (EMIS, 2022).

La circulation routière est de loin la principale source de bruit en Suisse, suivie des trafics ferroviaire et aérien. Tandis que le bruit de propulsion des voitures de tourisme modernes a diminué, le bruit de roulement a augmenté en raison du poids accru de celles-ci et de la plus grande largeur des pneus.

En 2020, la Suisse comptait 4,7 millions de voitures de tourisme, avec lesquelles 49 milliards de véhicules-kilomètres et environ 80 milliards de personnes-kilomètres² ont été parcourus (OFS, 2022A). En 2021, 98,5 % des véhicules étaient équipés d'un moteur à combustion (OFS, 2022B). L'offre et la part de marché des voitures de tourisme électriques à batterie (*Battery Electric Vehicles*, BEV) augmentent cependant constamment depuis quelques années. En 2022, les BEV représentaient presque 18 % des nouvelles immatriculations de voitures de tourisme (cf. fig. 2). La figure 2 montre la répartition des différentes technologies de propulsion des voitures de tourisme nouvellement mises en circulation en 2022.

² Le taux d'occupation moyen est de 1,6 personne par véhicule.

Nouvelles immatriculations de voitures de tourisme, par type de propulsion 2022

Essence	84812	37,55%	
Hybride (non rechargeable)	56562	25,04%	
Électrique à batterie	40186	17,79%	
Diesel	26237	11,62%	
Hybride rechargeable	17886	7,92%	
Gaz/bivalent/autres	126	0,06%	
Hydrogène	72	0,03%	

Figure 2 : Nouvelles immatriculations de voitures de tourisme, par type de propulsion en 2022 (OFROU, 2022)

Les émissions de polluants atmosphériques et de GES rejetées par les gaz d'échappement représentent une part importante de l'impact environnemental des véhicules équipés d'un moteur à combustion. Dans le cas des voitures à propulsion électrique, ce sont en revanche les émissions liées à leur construction qui prédominent ; ces émissions ont donc déjà été produites – en grande partie à l'étranger – au moment de l'utilisation du véhicule.

Les écobilans peuvent être utilisés pour déterminer les impacts environnementaux des voitures de tourisme sur l'ensemble de leur durée de vie kilométrique, indépendamment du lieu de leur utilisation. L'écobilan permet de prendre en compte une grande palette d'impacts environnementaux. La méthode de la saturation écologique (aussi appelée méthode UBP) permet d'évaluer et de comparer ces impacts. Le critère d'évaluation de cette méthode s'oriente sur les objectifs de protection de la législation suisse sur l'environnement. En plus de l'impact environnemental global établi à l'aide de la méthode de la saturation écologique, le présent rapport se concentre sur les émissions de GES et les bilans en matière de besoins énergétiques. Ces indicateurs et d'autres bases sont présentés plus en détail au chapitre suivant.

La technique progressant rapidement, en particulier dans le domaine des BEV, certains résultats diffèrent nettement de ceux de l'écobilan réalisé il y a quelques années sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) (treeze, 2018). Le présent rapport technique résume les résultats des activités actuelles de l'OFEV en matière de relevé de jeux de données destiné à évaluer l'impact environnemental des voitures de tourisme en fonction des différents systèmes de propulsion. Il présente les hypothèses retenues et les modélisations effectuées en tenant compte des données et des connaissances les plus récentes. Il évalue en outre les potentiels de développement (cf. 3.5 et 4.4) pour montrer comment les atteintes environnementales pourront être encore réduites à l'avenir.

Remarque**Adaptation des caractéristiques des véhicules et du mix électrique dans le tableau Excel disponible sous « mobitool.ch »**

Le site www.mobitool.ch met à disposition un tableau Excel détaillé permettant de comparer les impacts environnementaux des différents moyens de transport. Ce tableau se base sur les mêmes inventaires que ceux utilisés dans le présent rapport. La saisie de paramètres spécifiques (p. ex. la durée de vie kilométrique) permet de procéder à une évaluation individualisée des performances du véhicule (consommation d'énergie, émissions de CO₂, impact environnemental, etc.).

2 Bases

2.1 L'écobilan, une méthode pour analyser l'impact sur l'environnement

L'écobilan, ou analyse du cycle de vie, est une méthode qui permet de collecter, de décrire et d'évaluer les pressions environnementales dues à un produit, notamment. L'écobilan porte sur l'ensemble du cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination, en passant par la fabrication, l'utilisation et le transport. Il détermine, dans le champ d'étude défini, la consommation d'énergie et de ressources, le rejet de polluants dans l'air, l'eau et le sol ainsi que le bruit occasionné.

Selon les normes ISO 14040 et 14044, l'écobilan d'un produit s'effectue en quatre phases (fig. 3).

- Phase 1 : définition de l'objectif et du champ d'étude de l'analyse souhaitée.
- Phase 2 : collecte et préparation des données sur les flux de substances et d'énergie qui jouent un rôle dans le cycle de vie du produit considéré. Cette phase est appelée **l'inventaire du cycle de vie** (ou écoinventaire), lequel est souvent volumineux.
- Phase 3 : analyse et évaluation de l'impact des émissions polluantes et de l'utilisation de ressources. Dans la pratique, il existe différentes méthodes pour évaluer les données de l'inventaire du cycle de vie, chacune ayant ses caractéristiques, ses points forts et ses points faibles.
- Phase 4 : évaluation et interprétation des résultats. Les résultats ainsi que les modèles et les données utilisés sont soumis à une analyse critique, et la stabilité des résultats est contrôlée à l'aide d'une analyse de sensibilité. Pour finir, les résultats sont interprétés. Il arrive souvent que les phases 2 et 3 soient répétées plusieurs fois (approche itérative).

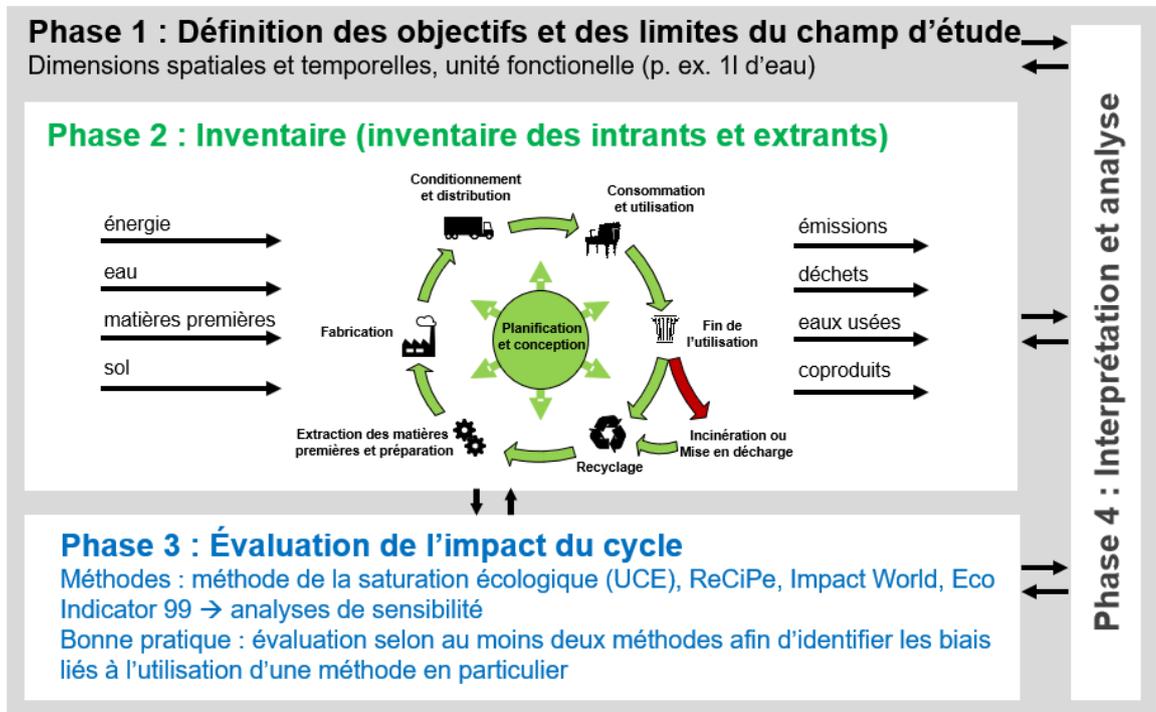


Figure 3 : Les quatre phases d'un écobilan, adaptation d'après ISO 14040

2.2 Évaluation de l'impact selon la méthode de la saturation écologique

Il existe différentes méthodes pour évaluer l'impact des émissions polluantes et de l'utilisation de ressources. En Suisse, la méthode de la saturation écologique (aussi appelée méthode UBP) est couramment employée. La version actuelle est celle de 2021 (OFEV, 2021).

La méthode de la saturation écologique permet de prendre en compte une grande palette d'impacts environnementaux et repose sur des variables appelées écofacteurs. Ces derniers expriment l'impact environnemental lié à une émission polluante ou à une utilisation de ressources en unités de charge écologique (ou écopoints ; UCE = UBP) par unité de quantité. L'écofacteur d'une substance est calculé selon le principe du « rapport à la quantité cible tolérée » (*distance to target*). Cette approche met en rapport les objectifs de protection de la législation sur la protection de l'environnement (grandeurs cibles) avec les émissions et les utilisations de ressources actuelles. Plus la différence entre les émissions actuelles et l'objectif de protection est importante, plus le facteur de pondération est élevé – et donc au final aussi l'écofacteur d'une émission polluante ou d'une utilisation de ressources. Les données sur les émissions actuelles proviennent des statistiques nationales ainsi que des banques de données de l'observation de l'environnement. Les objectifs de protection de la législation sur la protection de l'environnement s'appuient sur un consensus scientifique, mais ils sont aussi influencés par les responsables politiques. Avec la méthode de la saturation écologique, les impacts causés à l'étranger sont évalués comme s'ils étaient causés en Suisse. Ce principe permet de ne pas minimiser les impacts environnementaux occasionnés hors du territoire national par la demande intérieure. Par ailleurs, une même activité peut avoir des répercussions beaucoup plus graves à l'étranger qu'en Suisse, du fait de l'utilisation des ressources ou des émissions. Dans ce cas, la version suisse de la méthode de la saturation écologique sous-évaluerait la pollution à l'étranger. Tel est par exemple le cas pour le captage d'eau, qui affecte bien plus durement les écosystèmes lorsqu'il intervient dans des zones arides, ou encore pour l'exploitation intensive des sols par l'agriculture et l'industrie, qui a des impacts largement plus importants lorsqu'elle concerne des zones où la biodiversité est à l'origine très riche. L'idéal, dans ce genre de situation où le niveau de saturation écologique est plus élevé à l'étranger qu'en Suisse, est donc de procéder à une pondération différenciée par région (régionalisation). L'évaluation des produits et processus s'effectue alors sur la base d'une caractérisation régionale, puis est rapportée au contexte suisse au moyen des étapes de normalisation et de pondération. Pour les exemples mentionnés ci-dessus, des écofacteurs régionaux existent d'ailleurs déjà. Le nombre d'UCE généré par une émission ou l'utilisation de ressources est calculé en multipliant les quantités d'émissions ou de substance consommée établies dans le cadre de l'inventaire du cycle de vie par l'écofacteur correspondant. Pour finir, la méthode de la saturation écologique regroupe les différents résultats en un score unique par agrégation totale. Un nombre d'UCE peu élevé correspond à un faible impact environnemental (Fig. 4).

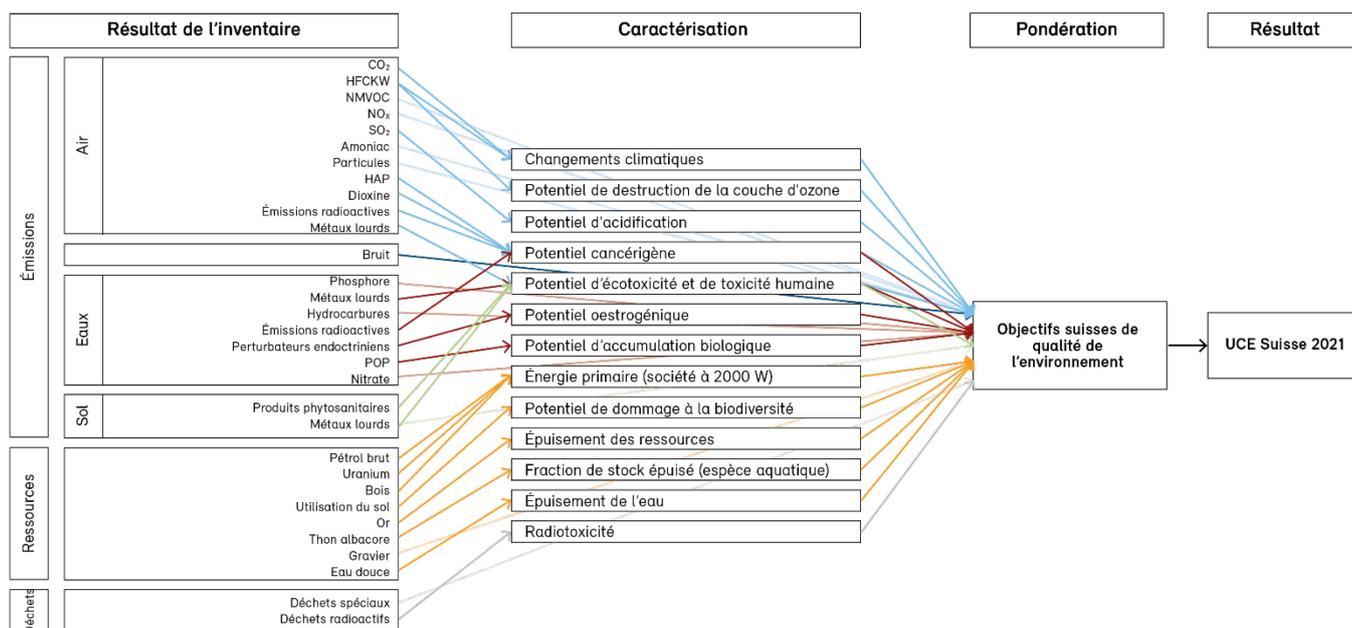


Figure 4 : Représentation schématique de la méthode de la saturation écologique

La méthode de la saturation écologique 2021 est décrite en détail dans la publication de l'OFEV « Écofacteurs suisses 2021 selon la méthode de la saturation écologique » (OFEV, 2021). À la différence de cette méthode, d'autres méthodes (p. ex. Impact 2002+ ou ReCiPe 2018) s'appuient sur une approche portant sur les dommages. Comme les deux approches ont leur pertinence ainsi que leurs atouts et leurs faiblesses, l'OFEV recommande de toujours appliquer si possible deux méthodes d'évaluation différentes afin de vérifier si les résultats vont tous dans le même sens et d'améliorer leur interprétation. Pour le présent rapport, deux méthodes d'évaluation ont été comparées (cf. 4.3).

2.3 Bases pour le bilan de l'impact environnemental des voitures de tourisme en fonction des différents systèmes de propulsion

2.3.1 Base de données utilisée pour l'écobilan

Les jeux de données utilisés pour les écobilans réalisés pour ce rapport proviennent de la base de données des écobilans du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) de 2018 (Base de données DETEC, 2018). Cette base de données, intitulée « UVEK_DQRv2_2018 », est disponible sur le site d'ecoinvent (version 2) sous la rubrique « Database » (<https://db.ecoinvent.org/index.php>) ; l'accès requiert une licence ecoinvent. Les données d'inventaire pour les voitures de tourisme ont été actualisées et au besoin complétées en 2021 et 2022 par l'Institut Paul Scherrer (IPS) sur mandat de l'OFEV. En outre, les nouvelles données d'inventaire ont été soumises à un examen critique. Les sources de données utilisées pour l'actualisation sont indiquées dans le tableau 1. La modélisation des véhicules actuels est décrite en détail dans le rapport « Life cycle inventories for on-road vehicles » (Sacchi & Bauer, 2021). La modélisation des futurs véhicules est décrite dans le rapport « Prospective life-cycle inventories for passenger cars in Switzerland » (Sacchi R. B., 2022). La base de données utilisée comprend aussi un inventaire relatif au mix d'électricité des consommateurs (ci-après « mix consommateur »), qui joue surtout un rôle important pour les véhicules électriques à batterie et à pile à combustible. Comme le mix consommateur a changé au cours des dernières années, l'inventaire du cycle de vie du mix utilisé dans la base de données DETEC 2018 a été remplacé par l'inventaire du cycle de vie actualisé pour le mix consommateur suisse (cf. 2.3.5 Énergie de propulsion).

2.3.2 Objectif et champ d'étude

Les travaux à l'origine de ce rapport visent à fournir des données de base transparentes et disponibles gratuitement pour évaluer l'impact des voitures de tourisme sur l'environnement en fonction des différents systèmes de propulsion. Le rapport présente des données d'inventaire actualisées pour les voitures de tourisme dans les domaines de l'énergie, de l'impact environnemental et des GES. Il examine en outre la seconde vie des batteries, le recyclage et les développements à venir en ce qui concerne la production de l'énergie de propulsion et la fabrication des batteries. Les inventaires pour les bus et les camions ont également été révisés ; ils ne sont pas présentés dans ce rapport mais sont aussi disponibles gratuitement. Toutes les données d'inventaire mentionnées dans ce rapport sont disponibles sous www.mobitool.ch et/ou sous la forme d'inventaires du cycle de vie.

Les inventaires du cycle de vie réalisés prennent en compte l'ensemble du cycle de vie du berceau à la tombe (*cradle-to-grave*). Ils englobent les phases suivantes du cycle de vie d'une prestation de transport :

- la construction du véhicule ;
- l'utilisation et la maintenance du véhicule, y compris l'approvisionnement en carburant ou la fourniture de l'énergie de propulsion nécessaire ;
- la construction et l'entretien des routes et de l'infrastructure correspondante ;
- l'élimination du véhicule, son démontage et le traitement de ses composants.

L'unité fonctionnelle pour les moyens de transport individuels (p. ex. vélos, scooters, voitures) est le véhicule-kilomètre (vkm). L'unité fonctionnelle pour les moyens de transport collectifs (p. ex. bus urbains et autocars) est le personne-kilomètre.

La limite technique du système englobe les domaines énumérés ci-dessous. Les domaines écrits **en gras** sont modélisés sur la base des inventaires actualisés ou nouvellement établis par l'Institut Paul Scherer (entièrement s'agissant des véhicules et partiellement s'agissant de la production énergétique). Tous les autres aspects sont modélisés avec les données de la base de données DETEC 2018.

- Extraction et la transformation de l'énergie et des matériaux nécessaires à la construction et au montage des composants du véhicule
- **Construction du véhicule et de ses composants**
- **Utilisation et la maintenance du véhicule, y compris l'ensemble de la chaîne énergétique**
- Construction et entretien des routes et de l'infrastructure correspondante
- **Démontage du véhicule et acheminement des fractions de matériau vers les différentes filières de traitement des déchets.** Les avantages environnementaux liés à l'utilisation de matériaux recyclés sont pris en compte dans les calculs.

Sur le plan temporel, le périmètre du système étudié va de la situation actuelle à l'année 2050. Pour la situation actuelle, l'année 2021 a été choisie comme année de référence pour les inventaires actualisés et les nouveaux inventaires. Pour l'analyse prospective, des inventaires ont été établis pour les années 2030, 2040 et 2050. À cet effet, deux scénarios principaux fondés sur les « Perspectives énergétiques 2050+ » de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) ont été utilisés : le scénario « Poursuite de la politique actuelle » (PPA) et le scénario « Zéro émission nette »

(ZÉRO base). Par ailleurs, des types de véhicules supplémentaires ont été modélisés pour étudier certains aspects potentiellement critiques du cycle de vie du véhicule (p. ex. une durée de vie kilométrique plus élevée, la réutilisation des batteries). Sur le plan géographique, les limites du système englobent la Suisse (utilisation du véhicule, production énergétique), l'Europe (construction des véhicules, fabrication des batteries, production énergétique), l'Asie (fabrication des batteries) et les provenances définies dans les inventaires préexistants.

2.3.3 Évaluation de l'impact

Il existe différentes méthodes et approches pour évaluer l'impact. Suivant l'approche adoptée, l'impact est évalué au niveau de la catégorie d'impact (*midpoint*), de la catégorie de dommages (*endpoints*) ou sur la base du principe du rapport à la quantité tolérée (*distance-to-target*). Les résultats peuvent être présentés séparément par catégorie ou sous une forme agrégée qui peut aller jusqu'à une agrégation totale (*single score*). Dans ce rapport, l'impact est évalué avec la méthode de la saturation écologique, qui procède par agrégation totale. Cette méthode a été choisie, car elle met en rapport les émissions et les utilisations de ressources actuelles en Suisse avec les objectifs de protection de la législation sur la protection de l'environnement (grandeurs cibles) (cf. 2.2). Outre l'impact environnemental exprimé en UCE, ce rapport présente deux catégories d'impact en raison de leur importance dans le domaine des transports : le potentiel d'effet de serre (IPCC, 2013) et la demande d'énergie cumulée (*Cumulative Energy Demand, CED*) (ecoinvent report No. 3, 2010). La méthode Impact2002+ (Jolliet, et al., 2003), qui procède par agrégation totale, est utilisée dans le contexte d'une analyse de sensibilité destinée à évaluer l'influence du choix de la méthode (cf. 4.3).

2.3.4 Sources de données pour la modélisation des véhicules actuels

Plusieurs sources de données ont été utilisées pour actualiser les inventaires des véhicules. Les principales d'entre elles sont indiquées dans le tableau 1. D'autres informations sur ce point figurent dans Sacchi (2021).

Tableau 1 : Sources des données utilisées pour établir les inventaires des véhicules

Titre/nom	Auteur/éditeur	Utilisation
DETEC 2018	OFEV	Données de base sur les processus en amont
Manuel informatisé des coefficients d'émission du trafic routier (Handbook of Emission Factors [HBEFA])	INFRAS	Validation des facteurs d'émission
Perspectives énergétiques 2050+	OFEN	Mix énergétique
Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019	Agence européenne pour l'environnement (AEE)	Facteurs d'émission des moteurs à combustion
Vehicle Energy Consumption Calculation Tool - VECTO	Commission européenne	Consommation d'énergie
« Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios »	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020)	Composants du véhicule et carrosserie, paramètres liés à l'utilisation
« When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? »	(Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)	Composants du véhicule et carrosserie, paramètres liés à l'utilisation

2.3.5 Véhicules et catégories de véhicule modélisés

La catégorisation des véhicules et les inventaires des véhicules réalisés sont décrits en détail dans Sacchi & Bauer (2021). Les données relatives aux véhicules dits « rechargeables » relevées en 2021 par l'OFEV en collaboration avec auto-suisse dans le cadre de la « Feuille de route pour la mobilité électrique 2022 » (mesure 60) ont été prises en compte. Les principaux points concernant la catégorisation et la modélisation sont brièvement abordés ci-dessous.

Catégorisation des véhicules

La catégorisation des véhicules s'appuie sur les segments définis par la Commission européenne ; les catégories de l'UE « mini » et « petite » sont réunies dans la catégorie « compacte » et les véhicules utilitaires sportifs (*Sports Utility Vehicle*, SUV) de taille moyenne sont classés dans la catégorie « supérieure » (tab. 2).

Tableau 2 : Catégories de véhicule selon (Sacchi & Bauer, 2021). Les véhicules électriques sont écrits en gras dans la colonne « Exemples ».

Segment UE		Désignation	Surface (m ²)		Poids à vide (kg)		Exemples
	Définition		De	À	De	À	
L7e	<i>Micro cars/Heavy quadricycles</i>	Catégorie micro		3,4	400	600	Microlino Renault Twizy,
A, B	<i>Mini and Small cars</i>	Catégorie compacte	3,5	3,8	900	1350	Dacia Spring Fiat 500 (e) Renault Clio Renault Twingo (e) Renault Zoé ZE40 Toyota Yaris, VW Polo,
C	<i>Medium cars</i>	Catégorie moyenne	3,8	4,4	1250	1750	Audi A4 Hyundai Kona electric Mercedes-Benz A-Klasse Renault Zoé ZE50 Skoda Octavia Tesla Model 3 SR+ Volvo XC40 VW Golf VW ID.3
D, J	<i>Large cars and medium-size Sport utility cars</i>	Catégorie supérieure	4,4		1450	2000	BMW 5er Tesla Model 3 LR Mercedes-Benz E-Klasse Skoda Enyaq iV60 VW Tiguan
J	<i>Sport utility cars</i>	Catégorie supérieure SUV	6		2000	2500+	Audi e-tron Audi Q7 BMW X7 Mercedes-Benz GLS Skoda Enyaq iV80

Systèmes de propulsion pris en compte

Lorsqu'on effectue l'écobilan d'un véhicule, la masse de ce dernier ou celle de ses composants et de ses matériaux est plus importante que sa catégorie. L'évaluation de l'impact environnemental d'un véhicule donné doit donc tenir compte du poids de ce dernier et non de son modèle. Lors d'un écobilan, un même modèle de BEV peut ainsi appartenir à différentes catégories selon

la taille de la batterie proposée. C'est par exemple le cas de la Renault Zoé, de la Tesla Model 3 et de la Skoda Enyaq (tab. 2). Les technologies de propulsion suivantes ont été modélisées pour les catégories compacte, moyenne, supérieure et supérieure SUV :

- véhicules équipés d'un moteur à combustion interne (*Internal Combustion Engine* [ICE]) : essence, diesel, gaz naturel ;
- véhicules électriques hybrides (*Hybrid Electric Vehicles* [HEV]) : essence, diesel ;
- véhicules électriques hybrides rechargeables (*Plug-in Hybrid Vehicles* [PHEV]) : essence ou diesel et électricité ;
- véhicules électriques à batterie (*Battery Electric Vehicles* [BEV]) : électricité ;
- véhicules électriques à pile à combustible (*Fuel Cell Electric Vehicles* [FCEV]) : hydrogène.

Pour la catégorie micro, seul un BEV a été modélisé.

Véhicules modélisés

Le tableau 3 présente les principales hypothèses relatives aux catégories de véhicule et aux véhicules retenus pour ce rapport. Il contient tous les véhicules qui sont représentés dans les figures du rapport.

Tableau 3 : Principales hypothèses par catégorie de véhicule (Sacchi & Bauer, 2021)

Catégorie	Carburant	Propulsion (chimie de la batterie)	Poids à vide (kg)	Capacité de la batterie (kWh)	Consommation (en litre d'essence/diesel ou en kg de gaz ; kWh par 100 km ; part de conduite en mode électrique (UF) en %)			Consommation (énergie en MJ)	Prestation kilométrique (km)
					(l ou kg /100 km)	(kWh/100 km)	(%)		
Micro	Électricité	BEV (NCA)	528	17	-	10,7	100	38,6	60 000
Compacte	Essence	ICE	1180	-	5,3	-	-	168,5	200 000
	Essence	PHEV	1308	7	2,7	8,2	47	116,7	200 000
	Diesel	ICE	1216	-	4,0	-	-	142,5	200 000
	Diesel	PHEV	1293	7	2,3	8,2	47	112,0	200 000
	Électricité	BEV (NCA)	1284	40	-	16,1	100	58,0	200 000
Moyenne	Essence	ICE	1373	-	6,2	-	-	197,2	200 000
	Essence	HEV	1445	2	5,4	-	-	171,2	200 000
	Essence	PHEV	1438	10	3,2	8,7	47	132,0	200 000
	Diesel	ICE	1428	-	4,8	-	-	174,1	200 000
	Diesel	HEV	1425	2	3,9	-	-	142,8	200 000
	Diesel	PHEV	1432	10	2,7	8,7	47	131,7	200 000
	Gaz	ICE	1364	-	4,6	-	-	220,7	200 000

	H ₂	FCEV	1447	- ³	1,0	-	-	121,5	200 000
	Électri- cité	BEV (LFP)	1538	43	-	18,0	100	64,8	200 000
	Électri- cité	BEV (NCA)	1538	52	-	18,0	100	64,8	200 000
	Électri- cité	BEV (NMC)	1538	46	-	18,0	100	64,8	200 000
Supé- rieure	Es- sence	ICE	1788	-	8,4	-	-	264,9	200 000
	Es- sence	PHEV	2021	17	4,3	10,8	47	174,3	200 000
	Diesel	ICE	1815	-	6,5	-	-	236,4	200 000
	Diesel	PHEV	2008	17	3,9	10,8	47	182,5	200 000
	Électri- cité	BEV (NCA)	1909	83	-	20,7	100	74,5	200 000
Sup. SUV	Es- sence	ICE	2120	-	9,7	-	-	308,5	200 000
	Es- sence	PHEV	2355	16	4,9	12,5	47	201,6	200 000
	Diesel	ICE	2149	-	7,8	-	-	286,2	200 000
	Électri- cité	BEV (NCA)	2215	95	-	24,0	100	86,4	200 000

Énergie de propulsion

Pour l'énergie de propulsion, on utilise les agents énergétiques disponibles sur le marché ; pour les carburants fossiles, cela implique une part biogène de 2,4 % pour l'essence, de 5,6 % pour le diesel et de 27,3 % pour le gaz. Il a aussi été tenu compte du fait qu'en raison des exigences écologiques que doivent remplir les biocarburants pour faire l'objet d'un allègement fiscal, seuls les biocarburants issus de déchets ou de résidus sont utilisés dans la circulation routière en Suisse.

Pour le courant de charge, on utilise le mix consommateur (selon la production et le commerce d'électricité) avec des données de 2018 (Frischknecht, 2021). Ce mix électrique est aussi utilisé dans la recommandation actualisée de la Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics (KBOB) 2009/1:2022 et recommandé comme données de base pour le mix d'électricité utilisé en moyenne par les consommateurs finaux en Suisse. Il remplace le mix consommateur utilisé dans la base de données des écobilans du DETEC 2018, dont l'année de référence est 2014⁴. La composition du mix consommateur est indiquée dans le tableau 4. Le tableau indique aussi l'utilisation du produit électrique moyen provenant des énergies renouvelables (ci-après « électricité renouvelable »).

³ Les FCEV disposent d'une batterie comparable aux HEV, mais cela n'a pas été pris en compte dans la modélisation (cf. Sacchi (2021), p. 72)

⁴ Le mix consommateur utilisé dans la publication « Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme : indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant » n'était pas encore disponible au moment de l'établissement de ce rapport. Il présente des émissions de gaz à effet de serre plus basses que celles du mix consommateur utilisé dans le présent document (respectivement 108 g d'éq.-CO₂/kWh et 130 g d'éq.-CO₂/kWh). Cette différence ayant un effet minime sur le résultat du BEV par vkm, aucune adaptation n'a été apportée (OFEN, 2022).

Tableau 4 : Mix consommateur suisse 2018 et électricité renouvelable sur la base de l'intégration des valeurs horaires de la production et des échanges commerciaux (Frischknecht, 2021)

Technologie	Mix consommateur CH		Électricité renouvelable
	Parts	Dont en Suisse	
Lignite	2,6 %	0,0 %	
Houille	2,3 %	0,0 %	
Gaz naturel	4,1 %	0,0 %	
Autres énergies fossiles	1,1 %	0,5 %	
Énergie nucléaire	39,9 %	19,6 %	
Centrales de pompage-turbinage	3,2 %	2,1 %	
Biomasse	2,8 %	1,5 %	0,64 %
Force hydraulique	34,9 %	28,5 %	96,72 %
Énergie éolienne	4,9 %	0,1 %	1,70 %
Photovoltaïque	3,0 %	1,7 %	0,93 %
Déchets	1,3 %	0,9 %	
Total	100,0 %	55,0 %	100,0 %

Le tableau 5 indique l'impact environnemental de l'électricité utilisée dans les inventaires selon la technologie de production et pour le mix consommateur. L'impact environnemental de l'électricité issue du photovoltaïque (PV) doit être considéré comme trop élevé. En effet, selon les données des écobilans dans la construction 2009/1:2022 récemment publiées par la KBOB, les émissions de GES pour l'électricité photovoltaïque (toiture inclinée) en Suisse sont déjà aujourd'hui comprises entre 27 et 43 g d'éq.-CO₂/kWh lorsque le courant est produit sur place et entre 37 et 55 g d'éq.-CO₂/kWh lorsque le courant provient du réseau. Or ces données n'ont pas pu être prises en compte pour les travaux décrits ici. Leur influence sur un vkm est cependant très faible (cf. les résultats pour un BEV rechargé avec du courant photovoltaïque vs ceux pour un BEV rechargé avec du courant éolien à la fig. 15). La mise à jour de la base de données du DETEC prévue en 2023 s'appuiera sur les données des écobilans dans la construction 2009/1:2022 de la KBOB et contiendra donc les inventaires les plus récents relatifs au photovoltaïque.

Tableau 5 : Impact environnemental en UCE, émissions de GES et demande d'énergie cumulée par kWh de l'électricité utilisée dans les inventaires selon la technologie de production et le mix

Type de production de l'électricité	UCE/kWh	éq.-CO ₂ /kWh	MJ/kWh
2021			
Énergie éolienne CH ⁵	48	17	4,1
Photovoltaïque CH	162	80	5
Centrale nucléaire CH	567	15	13,7
Centrale à gaz	782	647	10,9
Centrale hydraulique CH	19	5	3,8
Électricité renouvelable	78	14	4,3
Mix consommateur	388	130	8,3

⁵ L'inventaire pour l'électricité provenant de l'énergie éolienne correspond à une production par une installation de ~600 kW.

Particularité des véhicules hybrides rechargeables

Pour tous les PHEV, une variante dans laquelle le véhicule n'est jamais rechargé avec une source externe a été modélisée pour évaluer l'effet du comportement de recharge. L'influence des hypothèses retenues est décrite sous 4.2 (« Aspects spécifiques relatifs aux véhicules actuels »).

2.4 Bases pour les développements techniques potentiels des voitures de tourisme

Pour pouvoir inclure le développement technique des voitures de demain dans l'analyse, les véhicules ont été modélisés pour les années 2030, 2040 et 2050 selon deux scénarios principaux. Ces deux scénarios se différencient par leur évaluation plutôt prudente (PPA) ou optimiste (ZÉRO base) du progrès technologique. Dans la modélisation, les futurs véhicules fonctionnent avec les agents énergétiques ou le mix électrique prévus par ces deux scénarios pour les années examinées (cf. Perspectives énergétiques 2050+). En plus des hypothèses relatives à la composition des carburants et au mix électrique, les scénarios définissent le lieu de production des BEV et des carburants synthétiques ainsi que le poids des batteries pour les BEV (voir tab. 6). Les hypothèses retenues sont décrites en détail dans Sacchi (2021). Les principaux points sont brièvement abordés ci-après. Les progrès techniques et l'utilisation accrue des énergies renouvelables dans les processus en amont (extraction et traitement des ressources, mise à disposition d'installations de production d'électricité, etc.) n'ont pas pu être pris en compte.

Tableau 6 : Différences entre les scénarios principaux PPA et ZÉRO base

	PPA	ZÉRO base
Production énergétique CH/international	Selon les perspectives énergétiques 2050+ (cf. annexe 7.3, tab. 28 et 7)	Selon les perspectives énergétiques 2050+ (cf. annexe 7.3, tab. 29 et 8)
Réduction du poids des batteries par rapport à 2021	2030 : 0 % 2040 : - 10 % 2050 : - 20 %	2030 : - 23 % 2040 : - 47 % 2050 : - 58 %
Mix énergétique pour la fabrication des batteries (lieu de fabrication des batteries)	Global	Europe
Part des substances recyclées (Li, Ni, Co) dans les batteries	2030 : 0 % 2040 : 0 % 2050 : 0 %	2030 : Li 5 %, Ni 4 %, Co 17 % 2040 : Li 28 %, Ni 23 %, Co 67 % 2050 : Li 28 %, Ni 23 %, Co 67 %
Part du bioéthanol dans l'essence	2030 : 1 % 2040 : 1 % 2050 : 1 %	2030 : 6,5 % 2040 : 7 % 2050 : 7 % (+ 93 % synth.)
Part du biodiesel	2030 : 2 % 2040 : 2 % 2050 : 2 %	2030 : 1,9 % 2040 : 6,4 % 2050 : 21,2 % (+ 78,8 % synth.)

Sources des données pour la modélisation des futurs véhicules

La modélisation des futurs véhicules s'appuie sur différentes sources de données. Les principales sources sont réunies dans le tableau 7. D'autres indications figurent dans (Sacchi R. B., 2022).

Tableau 9 : Sources de données utilisées pour la modélisation des futurs véhicules

	Sources de données
Composants, design et taille du véhicule	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020) (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)
Agent énergétique	Perspectives énergétiques 2050+ (OFEN, 2022) ; carburants synthétiques : (Hank, et al., 2019), (van der Giesen, Kleijn, & Kramer, 2014), (Albrecht, Schmidt, Weindorf, Wurster, & Zittel, 2013)
Consommation	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020) (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)
Émissions dues à la combustion	(HBEFA, 2021), (European Environment Agency, 2019)
Émissions (autres)	(European Environment Agency, 2019)
Utilisation	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020), (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022), (OFROU, 2022)

Les deux scénarios partent de l'hypothèse que le poids de tous les véhicules va diminuer grâce à l'utilisation de composants légers (entre - 13 et - 15 % par rapport à l'année de référence 2021)⁶. En ce qui concerne les moteurs à combustion, on part de l'hypothèse que l'efficacité de la propulsion s'améliorera encore de 1 % jusqu'en 2030 puis restera inchangée, vu que les moteurs à combustion des voitures de tourisme ne seront ensuite probablement plus développés par les constructeurs. Pour les autres modes de propulsion, on part de l'hypothèse que l'efficacité de la propulsion et le poids des batteries des BEV et des PHEV connaîtront de légères améliorations après 2030. L'évolution de l'impact environnemental des voitures de tourisme dans les principaux scénarios est présentée sous 3.5.

En plus des scénarios PPA et ZÉRO base, des véhicules ont été modélisés en modifiant certains de leurs paramètres critiques (p. ex. durée de vie kilométrique) afin d'en étudier l'influence sur l'impact environnemental du véhicule. En plus des données sur le taux de recyclage et les mix énergétiques fournies par les deux scénarios, on a pu ainsi établir pour l'année 2050 des inventaires avec des carburants synthétiques fabriqués avec 100 % d'énergie photovoltaïque ou éolienne (fig. 13 et 14) et des inventaires avec des batteries de BEV et de PHEV fabriquées avec des substances (Li, Ni, Co) 100 % recyclées (cf. 4.4). Les paramètres étudiés sont regroupés dans le tableau 8. Par ailleurs, des cellules de batterie à densité énergétique plus élevée ont été modélisées pour les batteries des PHEV et des BEV. Comme il n'a pas d'incidence directe sur l'impact environnemental des véhicules, mais seulement sur leur autonomie électrique, ce point n'est pas davantage considéré dans ce rapport⁷.

Tableau 10 : Paramètres étudiés pour les perspectives d'avenir

Paramètre	Base	Analyse de sensibilité
Allongement de la durée de vie kilométrique des véhicules	200 000 km	300 000 km (+ 50 %)
Seconde vie : part de l'impact environnemental de la batterie imputable à son usage en seconde vie	0 %	50 %
Part des carburants synthétiques pour les véhicules équipés d'un moteur à combustion	0 %	100 %
Mix électrique (courant de charge et fabrication des carburants synthétiques)	PPA / ZÉRO base	100 % PV
Part des substances recyclées (Li, Ni, Co) dans la batterie		100 % éolien
		100 %

⁶ La réduction du poids est due à un accroissement de la part des matériaux plus légers comme l'aluminium dans la masse du véhicule. D'autres développements susceptibles d'influencer le poids du véhicule, p. ex. les exigences de sécurité ou le pouvoir d'achat, ne sont en revanche pas pris en considération (Sacchi & Bauer, 2021).

⁷ Dans la modélisation, la part maximale possible de conduite en mode électrique pour les PHEV est de 75 %. Comme cette part est déjà atteinte en 2030, une autonomie électrique accrue en 2040 et 2050 n'aura plus d'influence sur l'impact environnemental exprimé en vkm.

L'allongement de la durée de vie kilométrique du véhicule signifie qu'il est utilisé plus longtemps avant d'être éliminé. La notion de « seconde vie » désigne l'utilisation des batteries des BEV et des PHEV pour une autre fonction que la propulsion, par exemple pour le stockage stationnaire d'énergie. Dans ce cas, on examine quelles parts de l'impact environnemental lié à la fabrication de la batterie peuvent être imputées à la seconde utilisation et les conséquences qui en découlent pour l'impact du véhicule. Dans le scénario ZÉRO base, les carburants des moteurs à combustion sont en 2050 uniquement d'origine biogène ou synthétique.

Limites de la modélisation et incertitudes

La modélisation des futurs véhicules est naturellement entachée d'une grande incertitude. Pour que celle-ci soit aussi petite que possible, les hypothèses utilisées pour ce rapport s'appuient sur des prévisions, des modélisations et des hypothèses existantes ou sur des exigences à venir déjà fixées. Les aspects pour lesquels il n'existait pas de modélisations concrètes provenant d'autres sources sont par conséquent examinés autant que possible dans les analyses de sensibilité et non dans les scénarios. Les principales limites relatives aux modélisations et aux données utilisées pour établir les inventaires des véhicules sont décrites ci-dessous.

- On examine seulement les potentiels de développement des véhicules. Les améliorations potentielles des processus en amont, par exemple la fabrication de l'acier ou le mix énergétique utilisé pour la production de celui-ci, ne sont pas être prises en compte. L'impact environnemental des véhicules en 2030, 2040 et 2050 doit par conséquent être considéré comme une estimation prudente.
- La consommation d'énergie des véhicules ICE actuels est calculée à partir des données du véhicule en utilisant le cycle d'essai de la procédure d'essai harmonisée au niveau mondial pour les véhicules légers (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, WLTP*) et validée avec des valeurs mesurées. Dans les conditions de conduite réelle, la consommation d'énergie peut être jusqu'à 14 % plus élevée (Dornoff, Tietge, & Mock, 2020). La consommation d'énergie des futurs véhicules est déduite à partir des données actuelles ; pour les groupes motopropulseurs ICE, on part seulement d'améliorations minimales après 2030.
- Il manque encore des données empiriques sur la durée de vie des batteries des BEV et des PHEV. Le présent rapport part de l'hypothèse que la batterie ne doit pas être changée au cours de la durée de vie supposée du véhicule. Des données plus précises sur la durée de vie des types de cellules de batterie actuellement utilisées seront probablement disponibles dans quelques années.
- En ce qui concerne la construction et la composition matérielle des véhicules de demain, on ne peut qu'émettre des hypothèses. À cet égard, il faut noter que plus la part des agents énergétiques renouvelables dans l'énergie de propulsion est élevée, plus l'impact environnemental lié à la construction des véhicules gagne en importance.
- L'impact environnemental potentiel des carburants synthétiques dépend largement des parts imputables (allocation) au raffinage des matières premières. À l'heure actuelle, on ne sait pas comment se déroulera la production ni quelles quantités de produits seront fabriquées lors du raffinage. Les facteurs d'allocation utilisés sont donc entachés d'une grande incertitude.

3 Résultats

Les résultats présentés dans ce chapitre valent pour une certaine catégorie de véhicules sur la base des hypothèses retenues. Celles-ci sont sommairement présentées au chapitre 2 et détaillées dans Sacchi (2021). Comme une voiture de tourisme peut être utilisée de manières très différentes, ce qui peut avoir une influence considérable sur son impact environnemental par vkm, il faut autant que possible tenir compte du domaine concret d'utilisation. On pourra à cette fin utiliser le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

3.1 Comparaison des différentes technologies de propulsion

La comparaison de l'impact environnemental des différentes technologies de propulsion est effectuée sur la base de véhicules neufs (2021) de catégorie moyenne (cf. 2.3.5, tab. 2 et tab. 3). Les parts biogènes sont de 2,6 % (essence), 5,9 % (diesel) et 27,3 % (gaz). Le courant de recharge des batteries est le mix consommateur 2018 ou de l'électricité renouvelable (cf. 2.3.5, tab. 4 et tab. 5)⁸. La figure 5 présente les émissions de GES, les UCE et la demande d'énergie cumulée par vkm. Les barres sont divisées selon les éléments impliqués dans le cycle de vie, ce qui permet d'indiquer leur part respective dans les émissions et l'impact environnemental. La catégorie « Véhicule » comprend la consommation de matières premières et d'énergie lors de la construction et de l'élimination des véhicules ; la catégorie « Émissions directes » englobe toutes les émissions générées par l'usage du véhicule (y c. les émissions sonores et les émissions liées au processus d'abrasion⁹).

⁸ Les véhicules à moteur à combustion fonctionnant uniquement avec des biocarburants ne sont pas représentés, car la production des matières premières qui seraient nécessaires pour qu'une part importante de la flotte puisse rouler uniquement aux biocarburants ferait concurrence à la production des denrées alimentaires et des aliments pour animaux.

⁹Cf. Sections 5.1 (bruit) et 9.8 (abrasion) dans le rapport « Écofacteurs suisses 2021 selon la méthode de la saturation » écologique (sections disponibles uniquement dans le rapport en allemand) (OFEV, 2021).

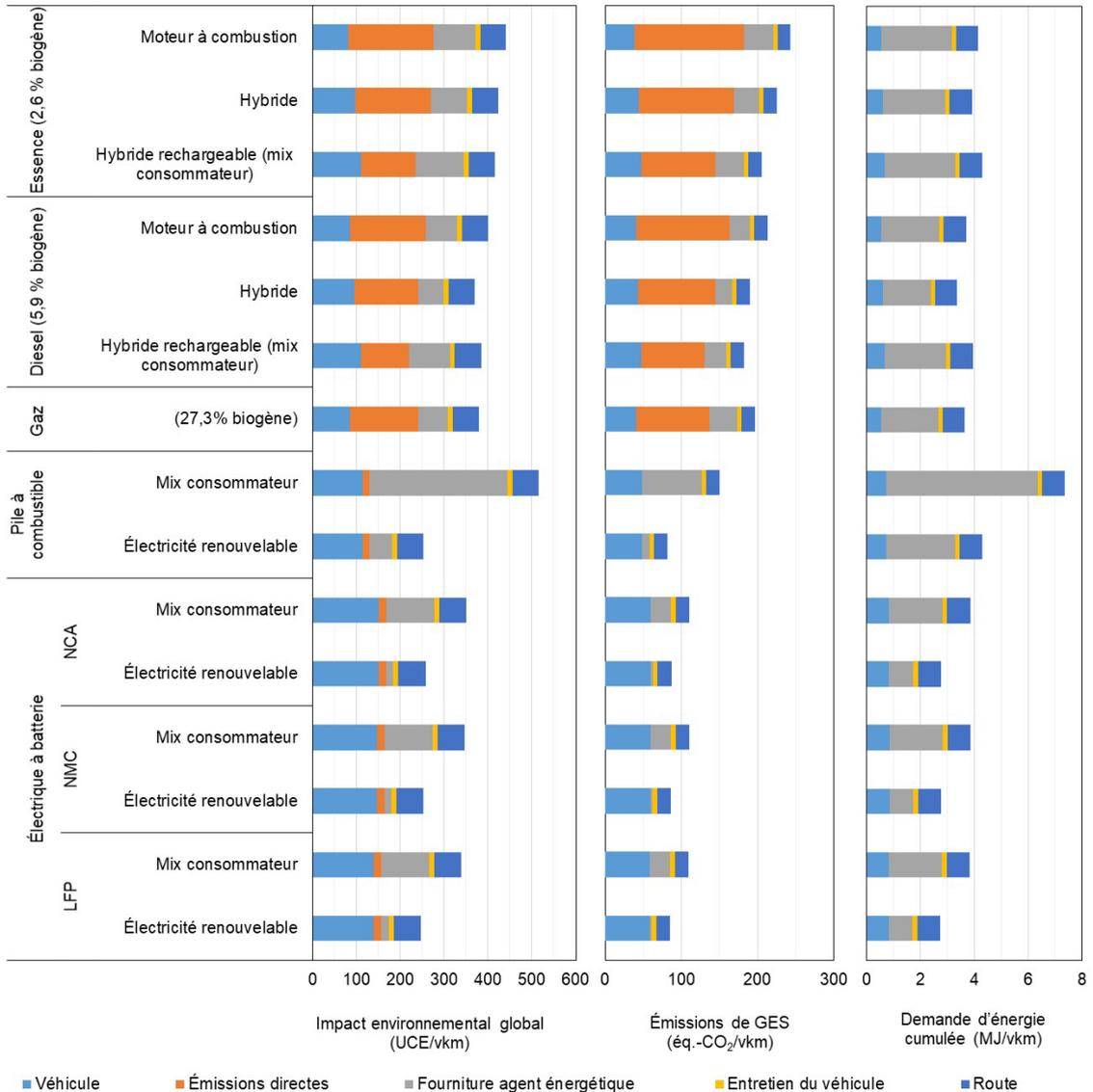


Figure 5 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2, valeurs chiffrées voir tab. 12)

Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)

Remarque : l'impact environnemental de véhicules donnés et un mix électrique individuel peuvent être évalués en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium

NMC : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt

LFP : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-fer-phosphate (LiFePO₄)

La **colonne centrale de la figure 5** indique les émissions de GES en g d'éq.-CO₂ par vkm. On voit que, dans le cas des véhicules équipés d'un moteur à combustion (ICE : essence, diesel, gaz), les émissions directes de GES résultant de la combustion des carburants fossiles prédominent. Parmi les véhicules purement thermiques, c'est le véhicule à essence qui rejette le plus de GES (243 g d'éq.-CO₂/vkm), suivi par les véhicules à diesel (213 g d'éq.-CO₂/vkm) et à gaz (196 g d'éq.-CO₂/vkm). À noter ici la part biogène élevée (27,3 %) du véhicule à gaz. Les véhicules qui combinent un moteur à essence et un moteur électrique émettent moins de GES (respectivement - 7 et - 13 % pour l'HEV et pour lePHEV) ; à cet égard, il convient de noter qu'en ce qui concerne le PHEV, le comportement de recharge a une influence considérable (cf. 4.2.2).

Les réductions des véhicules hybrides roulant au diesel sont de - 11 % (HEV) et - 15 % (PHEV). Lorsque l'hydrogène est produit avec le mix consommateur, les émissions de GES du FCEV (150 g d'éq.-CO₂/vkm) sont un peu plus basses que celles du PHEV à diesel¹⁰. Lorsque l'hydrogène est produit avec de l'électricité renouvelable, les émissions de GES du FCEV sont les plus faibles (82 g d'éq.-CO₂/vkm), et sont comparables à celles des BEV qui roulent à l'électricité renouvelable (85 - 87 g d'éq.-CO₂/vkm). La plus forte proportion d'émissions (69 %) est due à la construction des véhicules.

Les émissions de GES du BEV à batterie LFP rechargé avec du courant renouvelable (85 g d'éq.-CO₂/vkm) sont inférieures de 65 % à celles du véhicule à plus fortes émissions de GES (véhicule à essence). Cette différence est de 55 % lorsque le même BEV est rechargé avec le mix consommateur. Comme les BEV ont un meilleur rendement, ils présentent une différence entre les deux mix électriques examinés moins marquée que le FCEV.

La **colonne de gauche de la figure 5** indique l'impact environnemental global, mesuré en UCE par vkm. Les résultats présentent un tableau d'ensemble comparable à celui des émissions de GES, bien qu'avec des différences moins marquées. Cette similitude s'explique par le poids important des émissions de GES dans l'impact environnemental global (cf. fig. 6). Il est frappant de constater que lorsque l'hydrogène est fabriqué avec le mix consommateur, l'impact environnemental global du FCEV est supérieur de 17 % à celui du véhicule à essence. Avec de l'électricité renouvelable, l'impact du FCEV est par contre inférieur de 43 % à celui du véhicule à essence et proche du niveau de celui du BEV rechargé avec du courant renouvelable. Ce BEV à batterie LFP rechargé avec du courant renouvelable a le plus faible impact environnemental (247 UCE/vkm) ; cet impact est inférieur de 52 % à celui du FCEV qui, avec le mix consommateur, a la plus forte charge environnementale (520 UCE/vkm). L'impact environnemental du BEV à batterie LFP rechargé avec du courant renouvelable est inférieur de 44 % à celui du véhicule à essence (442 UCE/vkm).

La **colonne de droite de la figure 5** montre la demande d'énergie cumulée en mégajoule (MJ) par vkm. On voit notamment que dans le cas du FCEV, la différence entre un fonctionnement avec de l'électricité renouvelable et un fonctionnement avec le mix consommateur est nettement plus marquée que pour les BEV, ce qui est dû au caractère très énergivore de l'électrolyse de l'hydrogène et à la demande d'énergie cumulée presque deux fois plus élevée du mix consommateur (cf. tab. 5). La demande d'énergie cumulée du véhicule le plus sobre, le BEV rechargé avec du courant renouvelable, s'élève à 2,7 MJ/vkm et est inférieure de 63 % à celle du FCEV (mix consommateur), qui a la plus forte demande d'énergie cumulée (7,4 MJ/vkm). La demande d'énergie cumulée du BEV le plus performant (électricité renouvelable) est inférieure de 34 % à celle du véhicule à essence (4,2 MJ/vkm).

L'influence de la chimie des batteries (NCA, NMC, LFP) est faible dans les trois domaines (impact environnemental, émissions de GES et demande d'énergie cumulée).

Le PHEV rechargé avec du courant renouvelable n'est pas indiqué dans la figure 5. Ses émissions de GES et son impact environnemental sont inférieurs de respectivement 5 et 10 % à ceux du PHEV rechargé avec le mix consommateur.

L'impact environnemental global en UCE peut aussi être représenté selon les différentes catégories d'impact. Les véhicules de la figure 6 sont les mêmes que ceux de la figure 5, mais les barres sont divisées selon la catégorie d'impact et non selon les différents éléments impliqués dans le cycle de vie. Les impacts suivants sont indiqués : émissions de GES, polluants atmosphériques (NO_x et PM₁₀), consommation de ressources énergétiques et minérales, déchets radioactifs et métaux lourds émis dans l'air. Tous les autres impacts environnementaux sont réunis dans la catégorie « Autres ».

¹⁰ La production d'hydrogène est modélisée d'après (Zhang, 2017); elle utilise un électrolyseur à membrane électrolyte polymère. Le besoin d'électricité pour produire de l'hydrogène à 25 bar s'élève à 55 kWh/kg.

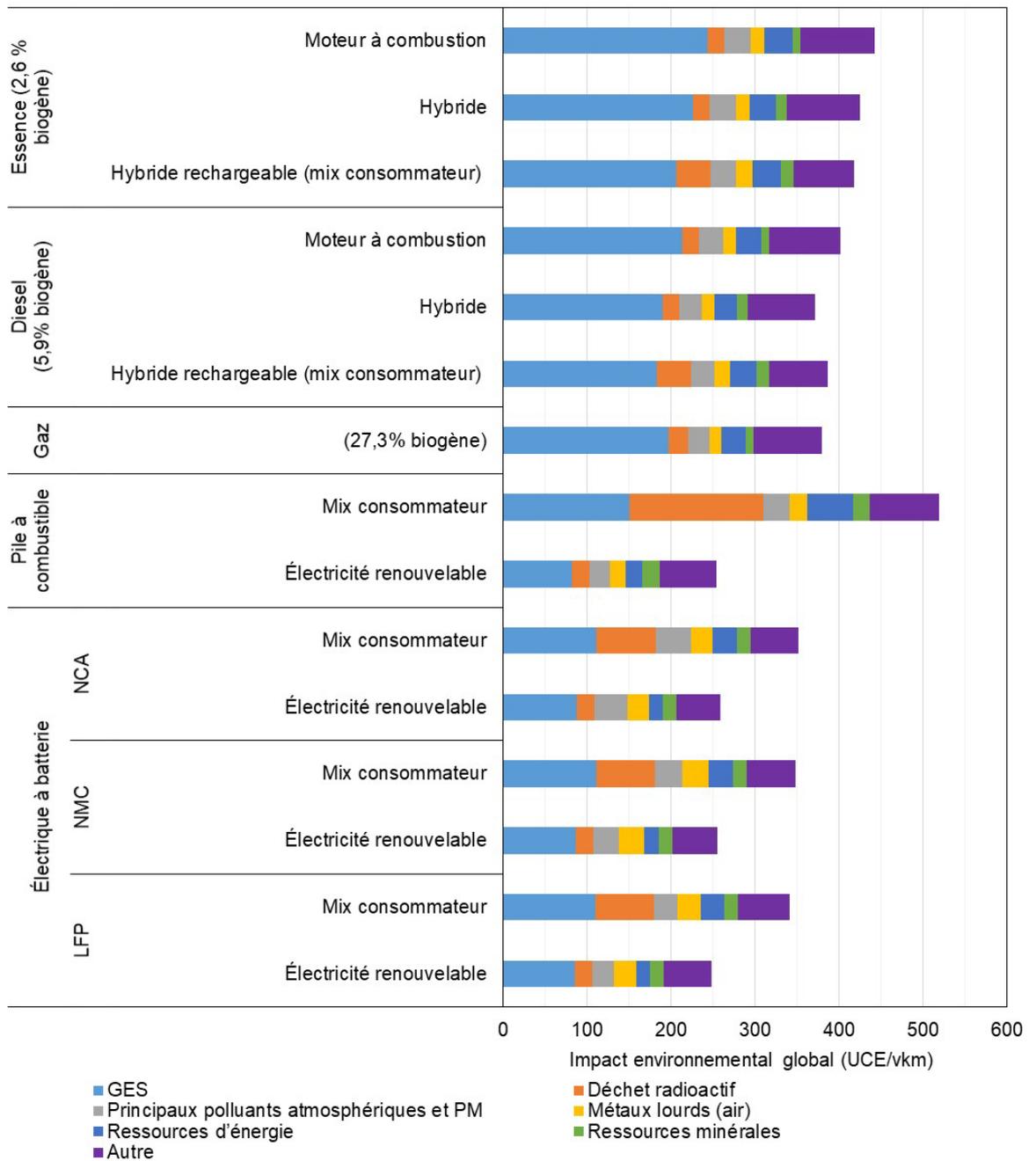


Figure 6 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global (ventilé par catégories d'impact) par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2)

Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Mix renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)

Remarque : l'impact environnemental de véhicules donnés et un mix électrique individuel peuvent être évalués en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium

NMC : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt

LFP : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-fer-phosphate (LiFePO₄)

La figure 6 montre bien que c'est surtout dans le groupe des véhicules équipés d'un moteur à combustion (ICE : essence, diesel, gaz) que les émissions de GES représentent la part la plus importante des atteintes environnementales globales. Les émissions de GES représentent environ 54 % de l'impact environnemental global des véhicules purement thermiques, 52 %

de celui des HEV et 48 % de celui des PHEV ; elles sont principalement liées à la fabrication et à l'utilisation du carburant (61-75 %) et à la construction du véhicule (16-26 %). S'agissant des véhicules électriques (BEV et FCEV), les émissions de GES représentent environ 32 % de l'impact environnemental global et sont dues avant tout à la construction du véhicule (presque 54 %), suivie de la production du mix d'électricité (25 %) et de la construction de l'infrastructure routière (21 %).

Lorsqu'un véhicule électrique est rechargé avec le mix consommateur, les déchets radioactifs constituent une part considérable de la charge environnementale globale, en particulier dans le cas du FCEV (29 %). Dans les autres cas, les déchets radioactifs représentent entre 8 et 12 % des atteintes environnementales globales. Les principaux polluants atmosphériques et les émissions de métaux lourds correspondent ensemble à une valeur comprise entre 10 et 19 % de l'impact environnemental global. Leur part plus élevée dans le cas des véhicules électriques est due avant tout à la construction du groupe motopropulseur, très gourmande en énergie, et aux émissions qu'elle génère ; l'utilisation des véhicules électriques ne génère en revanche presque pas d'émissions de polluants atmosphériques et de métaux lourds.

Les BEV consomment moins de ressources énergétiques (p. ex. pétrole, électricité) que les véhicules ICE, et ce indépendamment du type d'électricité utilisée (renouvelable ou mix consommateur). Le FCEV qui fonctionne avec le mix consommateur est le plus gourmand en ressources énergétiques. Cette situation s'explique par les différences d'efficacité des groupes motopropulseurs et par la production de l'énergie de propulsion nécessaire.

3.2 **Après combien de kilomètres parcourus une propulsion alternative est-elle plus respectueuse de l'environnement qu'un véhicule à essence ?**

La figure 7 montre l'impact environnemental de différents véhicules tout au long de leur durée de vie kilométrique. Il est ainsi possible de voir à partir de combien de kilomètres le BEV porte moins atteinte à l'environnement que le véhicule à essence, autrement dit à partir de quand la charge environnementale plus élevée due à la construction du BEV est compensée par la charge plus faible liée à son utilisation. La figure 7 présente les UCE, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée de BEV et de FCEV de catégorie moyenne fonctionnant avec le mix consommateur ou avec de l'électricité renouvelable. Une voiture de tourisme à essence de catégorie moyenne sert de référence. Le nombre de kilomètres à partir duquel le véhicule concerné a un impact environnemental plus faible que celui de la voiture de tourisme à essence est indiqué dans le tableau 20.

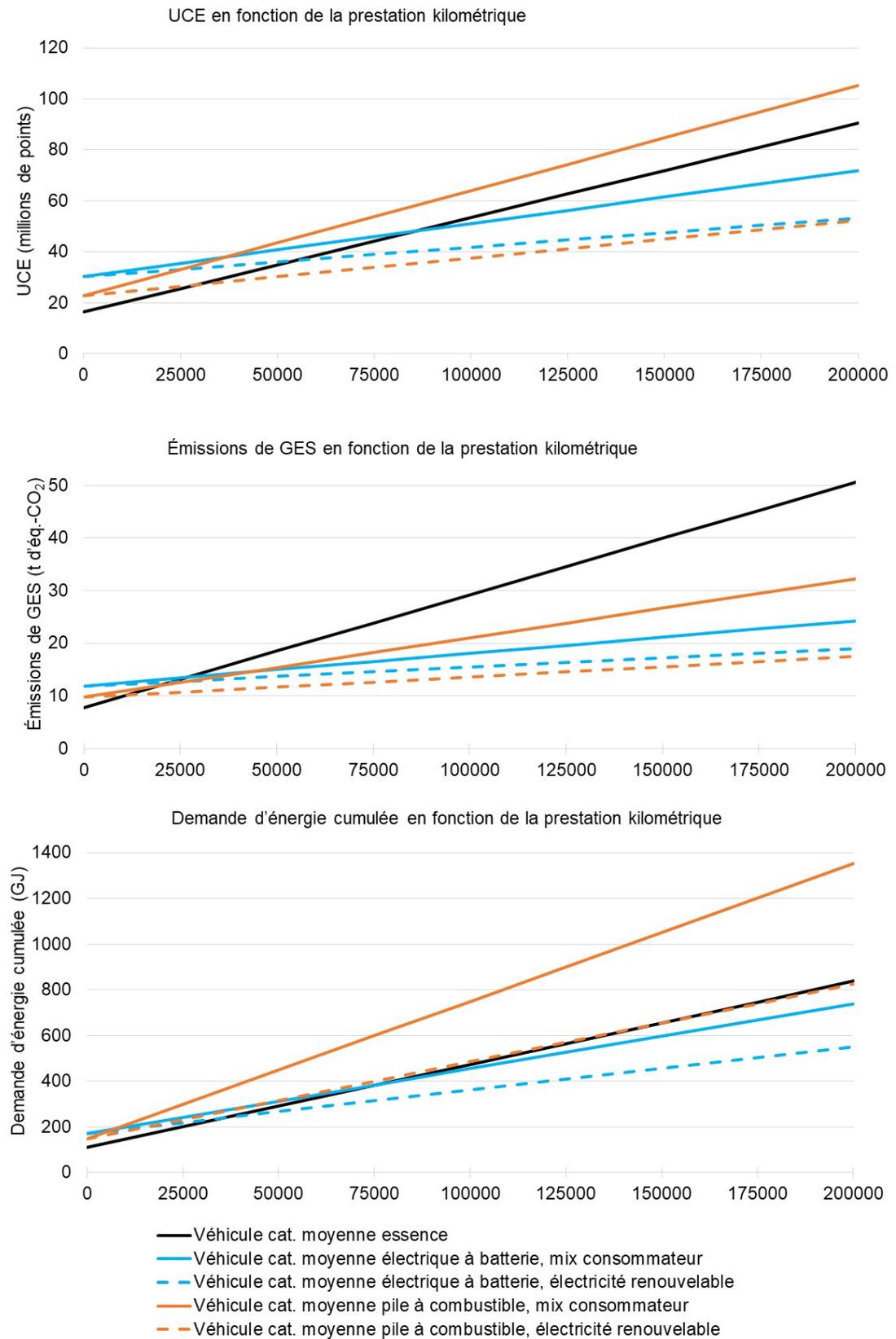


Figure 7 : Émissions de GES, impact environnemental global (UCE) et demande d'énergie cumulée en fonction de la prestation kilométrique

Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)

En ce qui concerne les **émissions de GES** (fig. 7, graphique du milieu), on constate que, selon le courant de recharge, les BEV (lignes bleu clair) présentent des émissions de GES plus basses que le véhicule à essence (ligne noire) après 23 000 km (électricité renouvelable) ou 27 000 km (mix consommateur). Selon l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène, les FCEV (lignes orange) atteignent ce point après 11 000 km (électricité renouvelable) ou 19 000 km (mix consommateur). Au terme d'une durée de vie kilométrique de 200 000 km, le véhicule à essence modélisé aura généré presque 51 t d'éq.-CO₂ (extrémité de la ligne noire), le BEV rechargé avec le mix consommateur 24 t d'éq.-CO₂ (extrémité de la ligne bleu clair) et le FCEV fonctionnant avec de l'hydrogène produit avec le mix consommateur 32 t d'éq.-CO₂ (extrémité de la ligne orange). Si le BEV est rechargé avec du courant renouvelable, les émissions s'élèvent à 19 t d'éq.-CO₂ (extrémité de la ligne bleu clair en traitillé) ; si le FCEV fonctionne avec de l'hydrogène produit avec de l'électricité renouvelable, les émissions s'élèvent à 18 t d'éq.-CO₂ (extrémité de la ligne orange en traitillé).

Si l'on considère les émissions cumulées de GES au bout de 200 000 km, on voit que l'électricité utilisée joue un rôle plus important pour les FCEV que pour les BEV. Entre un BEV rechargé avec de l'électricité renouvelable (graphique du milieu, ligne bleu clair en traitillé) et un BEV rechargé avec le mix consommateur (ligne bleu clair), la différence est d'environ 5 t d'éq.-CO₂ (+ 33 %). En revanche, un FCEV alimenté avec de l'hydrogène produit avec le mix consommateur (ligne orange) émet 15 t d'éq.-CO₂ (+ 74 %) de plus qu'un FCEV alimenté avec de l'hydrogène produit avec de l'électricité renouvelable (ligne orange en traitillé).

S'agissant de l'**impact environnemental global** mesuré en UCE (fig. 7, graphique du haut), on voit que les BEV portent moins atteinte à l'environnement que le véhicule à essence (ligne noire) à partir de 54 000 km (électricité renouvelable [ligne bleu clair en traitillé]) ou de 86 000 km (mix consommateur [ligne bleu clair en traitillé]). Le FCEV qui utilise de l'hydrogène produit avec le mix consommateur a un impact environnemental global nettement supérieur à celui du véhicule à essence de référence (ligne noire) pendant toute sa durée de vie kilométrique (200 000 km). Cette situation s'explique par le fait que le mix consommateur a dès le départ une charge environnementale importante, en particulier en raison de ses parts nucléaire et fossile, et que cette charge pèse beaucoup du fait de la production très énergivore de l'hydrogène. Lorsque l'hydrogène est produit avec de l'électricité renouvelable, le FCEV a un impact environnemental plus faible que le véhicule à essence de référence à partir de 30 000 km.

Le graphique du bas de la figure 7 présente l'évolution de la **demande d'énergie cumulée** des différents véhicules en fonction de leur prestation kilométrique. On voit que la demande d'énergie cumulée des FCEV est nettement plus élevée que celles des BEV et du véhicule à essence de référence. À partir de 36 000 km (électricité renouvelable) ou de 77 000 km (mix consommateur), la demande d'énergie cumulée des BEV est inférieure à celle du véhicule de référence. La demande d'énergie cumulée des FCEV est inférieure à celle du véhicule à essence après 147 000 km, si l'hydrogène est produit avec de l'électricité renouvelable.

3.3 Influence de la taille du véhicule

La figure 8 reprend les catégories de véhicule présentées dans les tableaux 2 et 3. La durée de vie kilométrique utilisée est la même pour tous les véhicules sauf pour celui de la catégorie micro. En raison du profil d'utilisation du véhicule de cette catégorie, on utilise pour celui-ci une durée de vie kilométrique plus courte (60 000 km) dans les données d'inventaire, ce qui a pour effet d'accroître l'influence de la construction du véhicule par kilomètre. L'impact environnemental d'une durée de vie kilométrique donnée peut être estimé en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

La capacité de la batterie (en kWh) est indiquée pour les BEV et les PHEV car le poids du véhicule et en particulier la taille de la batterie sont déterminants pour l'écobilan. À cet égard, il convient de noter que lorsqu'on fait l'écobilan d'un véhicule déterminé, la taille de sa batterie peut le faire correspondre à une autre catégorie. Par exemple, un BEV de catégorie compacte

équipé d'une batterie comparativement grande pour sa catégorie équivalra plutôt à un véhicule de catégorie moyenne ; à l'inverse, un BEV de catégorie supérieure équipé d'une batterie assez petite correspondra plutôt à un véhicule de catégorie moyenne.

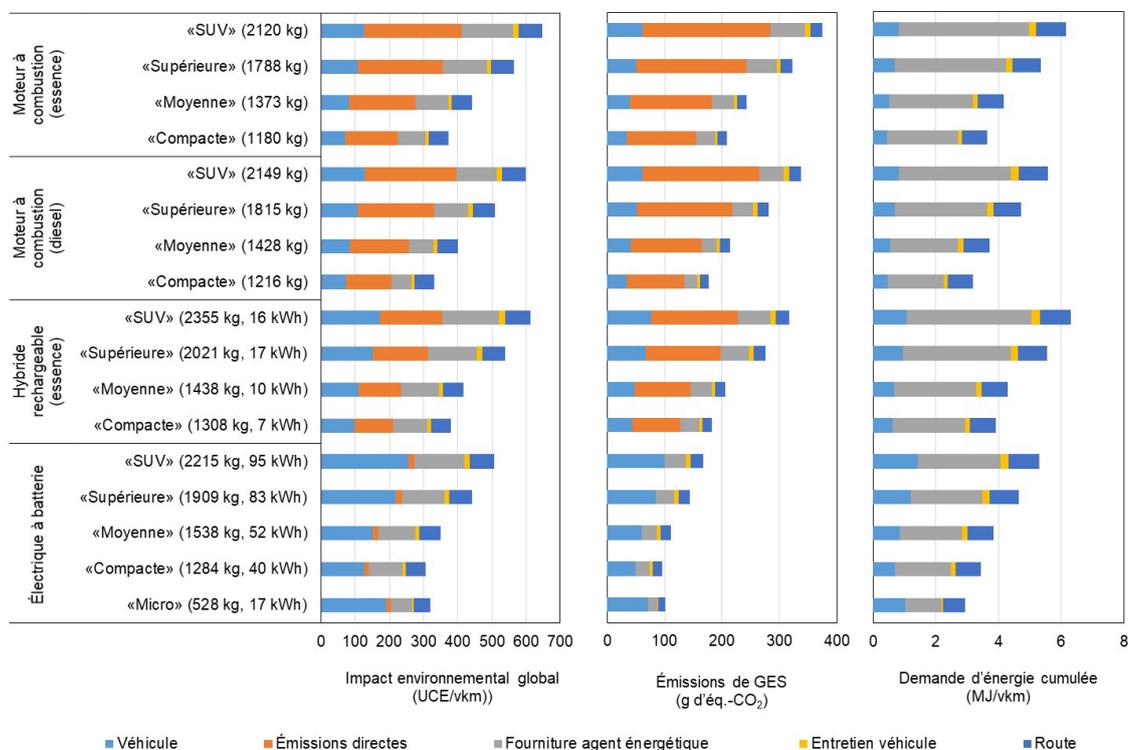


Figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (exemples de véhicules voir tab. 2, chimie de la batterie : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium [NCA]) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Comme on pouvait s'y attendre, les petits véhicules ont un impact environnemental global plus faible (fig. 8, colonne de gauche), génèrent moins d'émissions de GES (colonne du milieu) et ont une demande d'énergie cumulée moins élevée (colonne de droite) que les véhicules de plus grande taille équipés du même système de propulsion. Dans le cas des BEV, la taille de la batterie (déterminante pour l'autonomie du véhicule) joue un rôle prépondérant dans l'impact environnemental global et les émissions de GES, tandis que la consommation (production et fourniture de l'agent énergétique) joue un rôle moins important. Dans le cas des véhicules ICE, ce sont par contre surtout la consommation et notamment les émissions directes de GES générées lors de l'usage du véhicule qui pèsent le plus dans l'impact sur l'environnement.

Il est intéressant de noter que même le BEV équipé d'une batterie de grande taille (catégorie supérieure SUV) génère moins d'émissions de GES (colonne du milieu) que les véhicules de catégorie compacte qui roulent à l'essence ou au diesel. Si l'on considère l'impact environnemental global (colonne de gauche), on voit que celui des BEV est inférieur à celui des véhicules à essence ou diesel de même catégorie.

Le tableau 9 indique, pour chaque système de propulsion, les différences relatives entre les émissions de GES du véhicule de catégorie moyenne et celles des véhicules de catégories inférieure et supérieure. Alors que les véhicules de catégorie compacte émettent entre 11 et 17 % moins d'émissions de GES par kilomètre que le véhicule de catégorie moyenne, les véhicules de catégorie supérieure SUV émettent entre 51 et 58 % plus d'émissions que le véhicule de catégorie moyenne.

Tableau 11 : Émissions de GES des différentes catégories de véhicule par rapport au véhicule de catégorie moyenne

	Micro	Catégorie compacte	Catégorie moyenne	Catégorie supérieure	Catégorie supérieure SUV
Essence		- 14 %	0 %	+ 32 %	+ 54 %
Diesel		- 17 %	0 %	+ 32 %	+ 58 %
Hybride rechargeable essence		- 11 %	0 %	+ 34 %	+ 54 %
BEV	-8 %	- 14 %	0 %	+ 30 %	+ 51 %

La plus grande différence est celle entre le véhicule à essence de catégorie supérieure SUV et le BEV de catégorie compacte, ce dernier générant 75 % moins d'émissions de GES. Le potentiel de réduction entre ces deux véhicules est de 53 % pour les UCE et de 44 % pour la demande d'énergie cumulée (cf. les valeurs absolues dans les tab. 15 à 17).

3.4 Comparaison avec les autres moyens de transport

La base de données utilisée pour le présent rapport (DETEC 2018) contient aussi des inventaires pour d'autres moyens de transport et permet donc de comparer l'impact environnemental et les émissions de GES de ces derniers avec ceux des différents types de voitures de tourisme. Une telle comparaison doit toutefois tenir compte du fait que, selon la distance à parcourir, certains moyens de transport sont plus appropriés que d'autres. À cet effet, l'impact environnemental des différents moyens de transport est exprimé non pas en vkm ou en personne-kilomètre mais par personne et pour trois distances (5, 30 et 100 km) en appliquant un taux d'occupation moyen conforme à l'inventaire (trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne) (cf. fig. 9 et 10). Le courant de recharge des vélos, des scooters et des voitures de tourisme électriques est le mix consommateur CH. Les différents moyens de transport peuvent aussi être comparés sous www.mobitool.ch. Les principaux paramètres, par exemple le taux d'occupation, peuvent y être adaptés (cf. tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch).

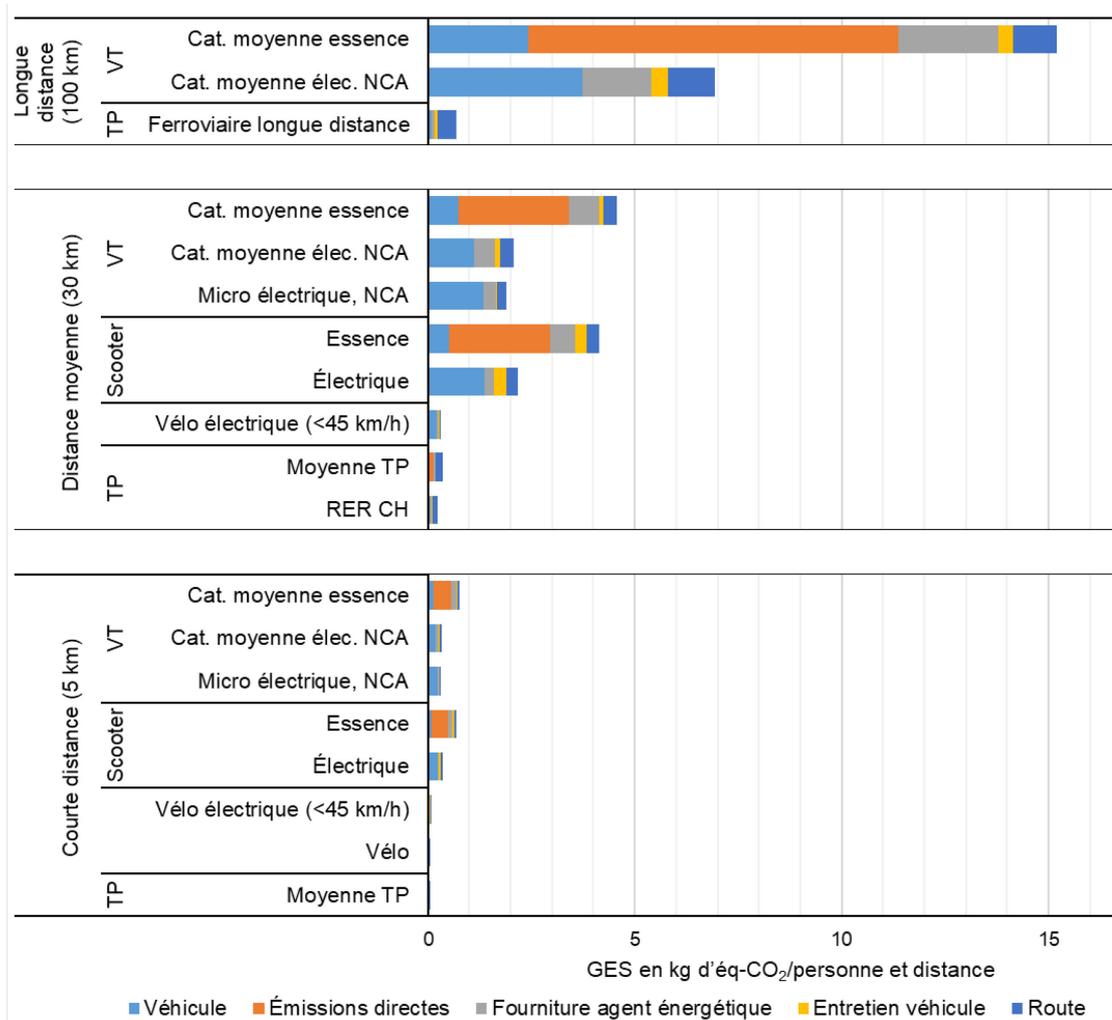


Figure 9 : Émissions de GES par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen

Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne (données voir tab. 18)

NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium

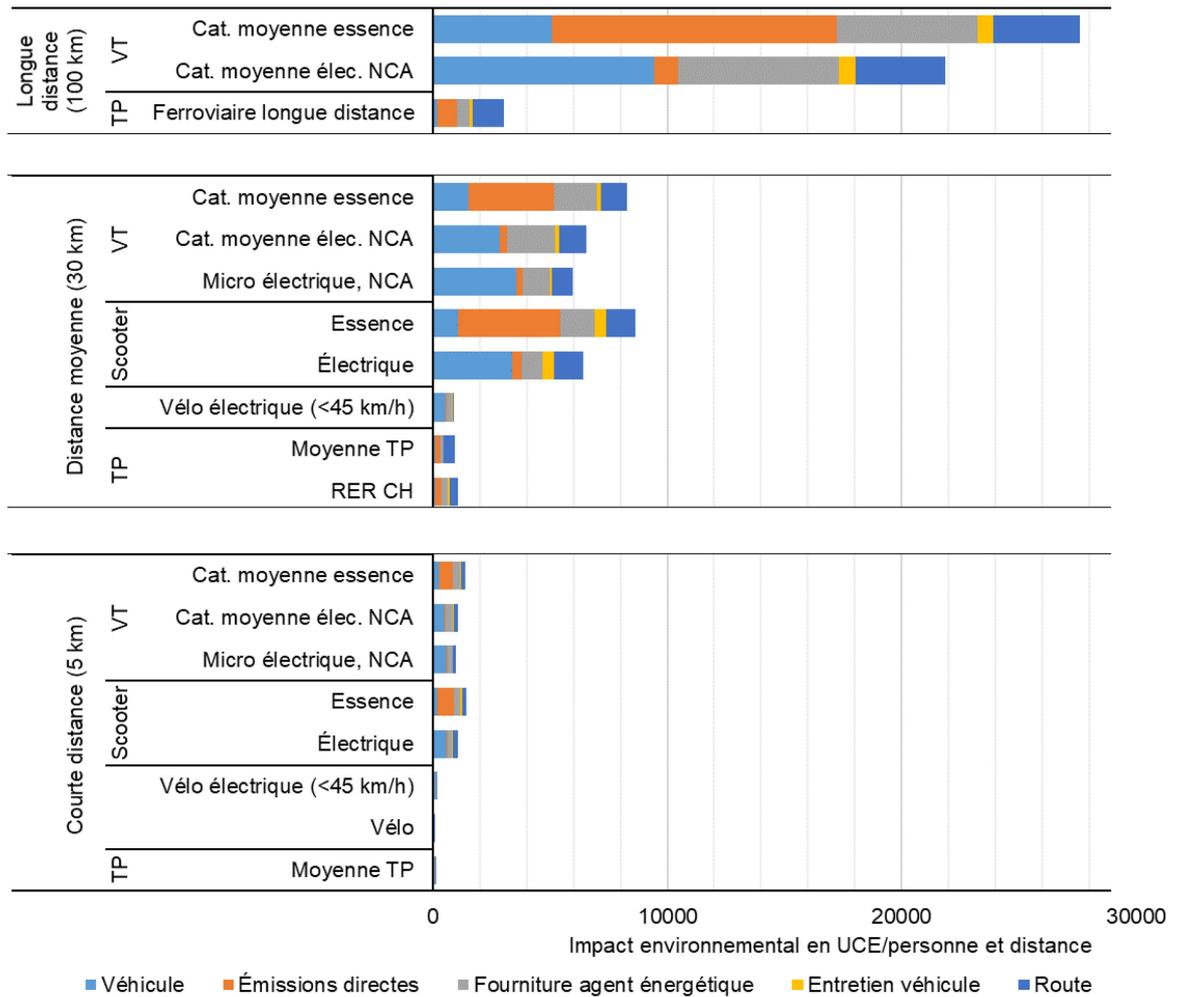


Figure 10 : UCE par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen
 Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne (données voir tab. 19)
 NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium

La comparaison montre clairement que, quelle que soit la distance considérée, ce sont les transports publics (TP) et les déplacements à vélo qui génèrent le moins d'émissions de GES et de nuisances environnementales. Le véhicule équipé d'un moteur à combustion (en l'occurrence ICE à essence) est en revanche celui qui rejette de loin le plus d'émissions de GES et porte le plus atteinte à l'environnement. Si l'on considère l'ensemble du cycle de vie du véhicule, un trajet de 100 km avec une voiture de tourisme à essence génère des émissions qui correspondent à environ 15 kg d'éq.-CO₂ par personne, ce qui est à peu près 26 fois plus qu'un même trajet de 100 km en train (trafic longue distance). Même un trajet de seulement 5 km avec une voiture de tourisme cause des émissions de GES qui sont comparables, voire supérieures, à celles d'un trajet de 100 km en train. Les émissions de GES des BEV sont certes inférieures à celles des voitures à essence, mais elles restent nettement supérieures à celles d'autres moyens de transport (déplacement à vélo, TP sur des distances courtes et moyennes ainsi que TP sur de plus longues distances). Ainsi, un trajet de 100 km avec un BEV génère un potentiel d'effet de serre correspondant à environ 6,9 kg d'éq.-CO₂ par personne, ce qui est dix fois plus élevé que les émissions produites par un tel trajet en train.

Les émissions de GES et l'impact environnemental des TP sont plus faibles que ceux des voitures de tourisme également sur les petites et les moyennes distances. Pour de tels trajets, le vélo et le vélo électrique sont des solutions qui nuisent très peu à l'environnement et qui y portent moins atteinte que les TP. Pour ce qui est des scooters, en revanche, leurs matériaux et leur

courte durée de vie kilométrique font qu'ils ont un impact environnemental par personne et par distance parcourue proche de celui des voitures de tourisme.

3.5 Potentiels de développement

Les figures 11 et 12 montrent les incidences climatiques et environnementales des voitures de tourisme dans les deux scénarios principaux décrits ci-dessus (cf. 2.4) Les graphiques présentent les résultats pour un HEV, un PHEV, un FCEV et un BEV. Les véhicules ICE ne sont pas représentés, car on part de l'hypothèse qu'à partir de 2030, la plupart des véhicules construits avec un moteur à combustion seront aussi munis d'un bloc électrique (véhicules hybrides). Les véhicules à moteur diesel ne sont pas non plus indiqués, car leur prise en compte ne permettrait pas de tirer des conclusions supplémentaires. Les émissions de GES et les UCE des véhicules de 2021 servent de grandeur de référence (cf. 3.1).

Pour les trois années modélisées (2030, 2040 et 2050), on part de l'hypothèse que le moteur à combustion des véhicules hybrides (HEV, PHEV) fonctionne uniquement avec de l'essence synthétique. Cette essence est produite dans un pays voisin avec le mix électrique du pays (scénario PPA : tab. 30, scénario ZÉRO base : tab. 31, annexe 7.3). Une autre solution aurait été de choisir un mélange de carburant synthétique et de carburant fossile, mais une telle hypothèse n'aurait rien changé sur le fond.

Le scénario PPA prévoit que l'hydrogène pour le FCEV est produit en Suisse avec le mix électrique correspondant. Le scénario ZÉRO base part quant à lui d'une demande globale accrue d'hydrogène en Suisse, ce qui fait que davantage d'hydrogène produit dans l'UE est utilisé (part d'hydrogène importé : 2040 = 26 %, 2050 = 57 % ; part de carburants synthétiques importés pour les années 2030-2050 : 100 %). L'influence du mix électrique utilisé dans la fabrication des carburants synthétiques est représentée dans les figures 13 et 14.

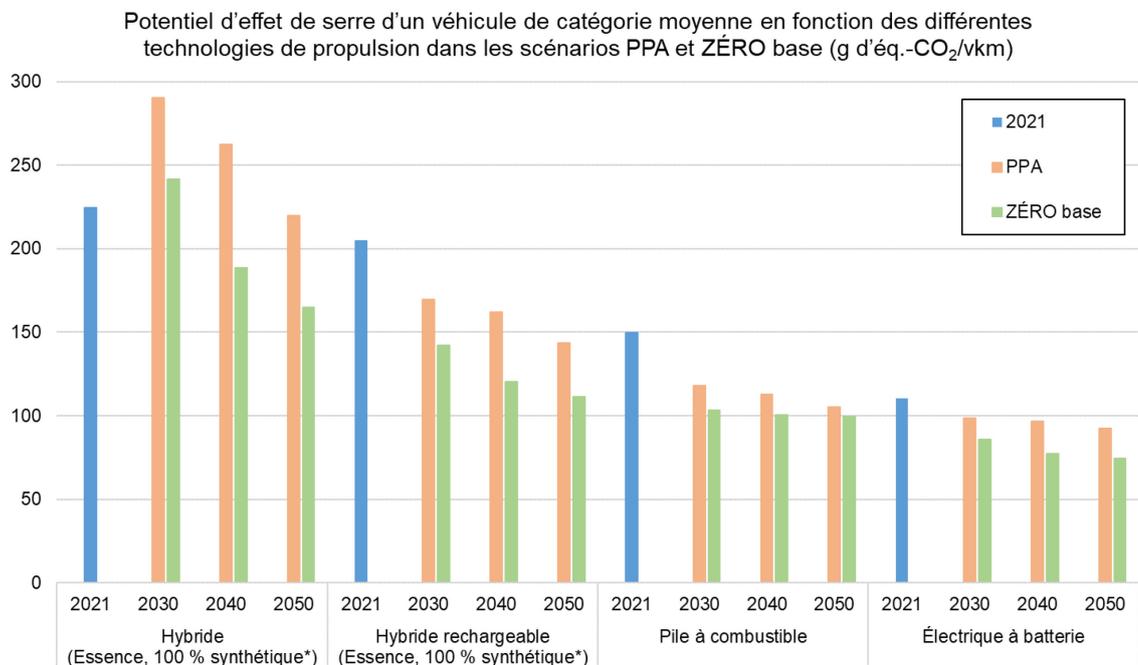


Figure 11 : Potentiel d'effet de serre d'un véhicule de catégorie moyenne en fonction des différentes technologies de propulsion dans les scénarios PPA et ZÉRO base, en g d'éq.-CO₂

* À partir de 2030, fabrication dans un pays voisin avec le mix électrique du pays (cf. annexe 7.3)

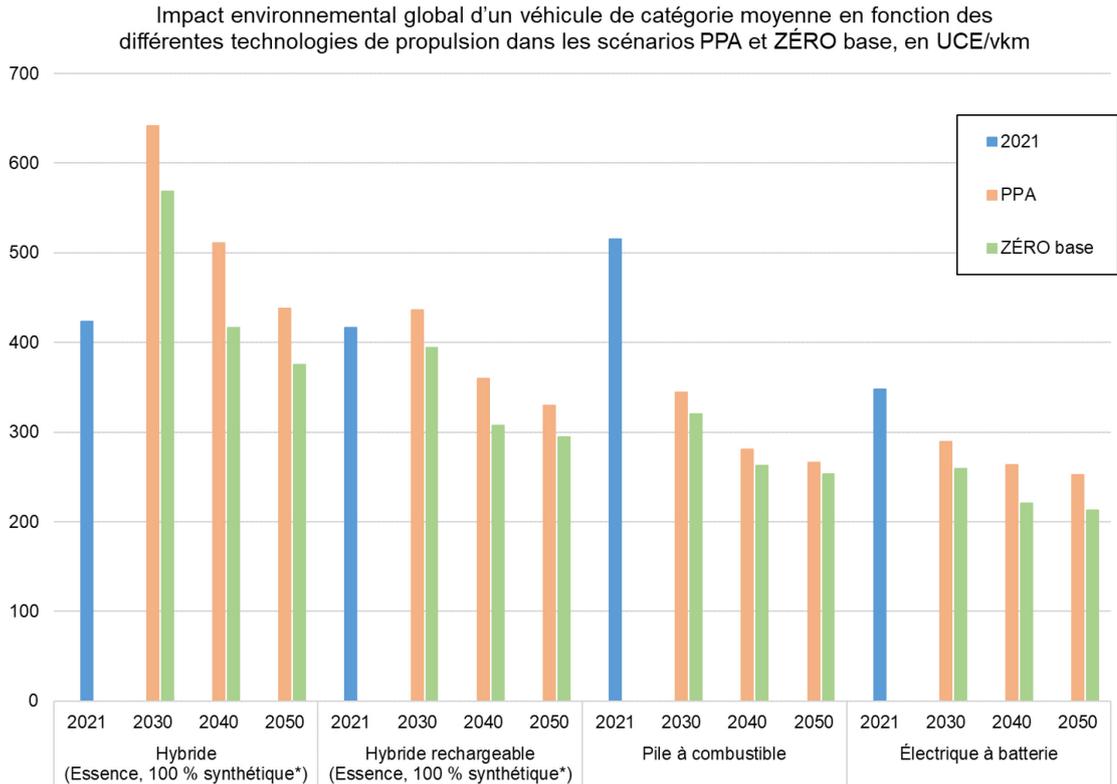


Figure 12 : Impact environnemental global d'un véhicule de catégorie moyenne en fonction des différentes technologies de propulsion dans les scénarios PPA et ZÉRO base, en UCE

* À partir de 2030, fabrication dans un pays voisin avec le mix électrique du pays (cf. annexe 7.3)

Dans le scénario PPA, les émissions de GES du HEV de 2050 ne sont que très légèrement inférieures à celles de 2021 ; l'impact environnemental global reste supérieur à celui de 2021 jusqu'en 2050. Cette situation est due au fait que le scénario prévoit encore une part fossile dans la production d'électricité pour la fabrication du carburant synthétique en 2050 (cf. tab. 30 et 31). Selon le scénario ZÉRO base, les émissions de GES du HEV de 2050 auront diminué de 27 % et son impact environnemental global, de 11 %.

Dans le scénario ZÉRO base, les émissions de GES du PHEV de 2050 diminuent de 46 % et atteignent à peu près le niveau de celles du BEV de 2021. Suivant ce même scénario, le PHEV de 2050 réduit son impact environnemental de 29 %. Selon les hypothèses retenues, les émissions de GES du HEV et du PHEV restent jusqu'en 2050 plus élevées que celles du BEV de 2021 (fig. 11). Il en va de même en ce qui concerne l'impact environnemental global du HEV, alors que celui du PHEV atteint le niveau actuel (2021) du BEV à partir de 2040 (fig. 12).

Le FCEV de 2050 peut réduire ses émissions de GES de 34 % et son impact environnemental global de 51 % (scénario ZÉRO base). Les émissions de GES et l'impact environnemental global restent cependant supérieurs à ceux du BEV de 2050.

Pour ce qui est du BEV, les émissions de GES et l'impact environnemental global diminuent de respectivement 39 et 32 % par rapport à 2021 (ZÉRO base 2050).

Dans le scénario ZÉRO base, c'est le BEV qui génère le moins d'émissions de GES et a le plus faible impact environnemental global en 2050. Tous les autres types de véhicules présentent des valeurs plus élevées : FCEV + 19 % (UCE) et + 33 % (GES), PHEV + 38 % (UCE) et + 49 % (GES), HEV + 76 % (UCE) et + 121 % (GES).

Influence de l'électricité utilisée pour produire l'énergie de propulsion

Les scénarios représentés (PPA et ZÉRO base) prévoient des différences importantes surtout pour les véhicules équipés d'un moteur à combustion. Afin de mieux mettre en évidence l'influence du mix électrique servant à fournir l'énergie de propulsion, les figures 13 et 14 présentent, en plus des deux scénarios modélisés, les résultats d'une modélisation où l'électricité utilisée provient uniquement de l'éolien. Des véhicules ICE fonctionnant à l'essence et au diesel synthétiques sont aussi modélisés. Tous les véhicules ont été modélisés avec une durée de vie kilométrique de 300 000 km.

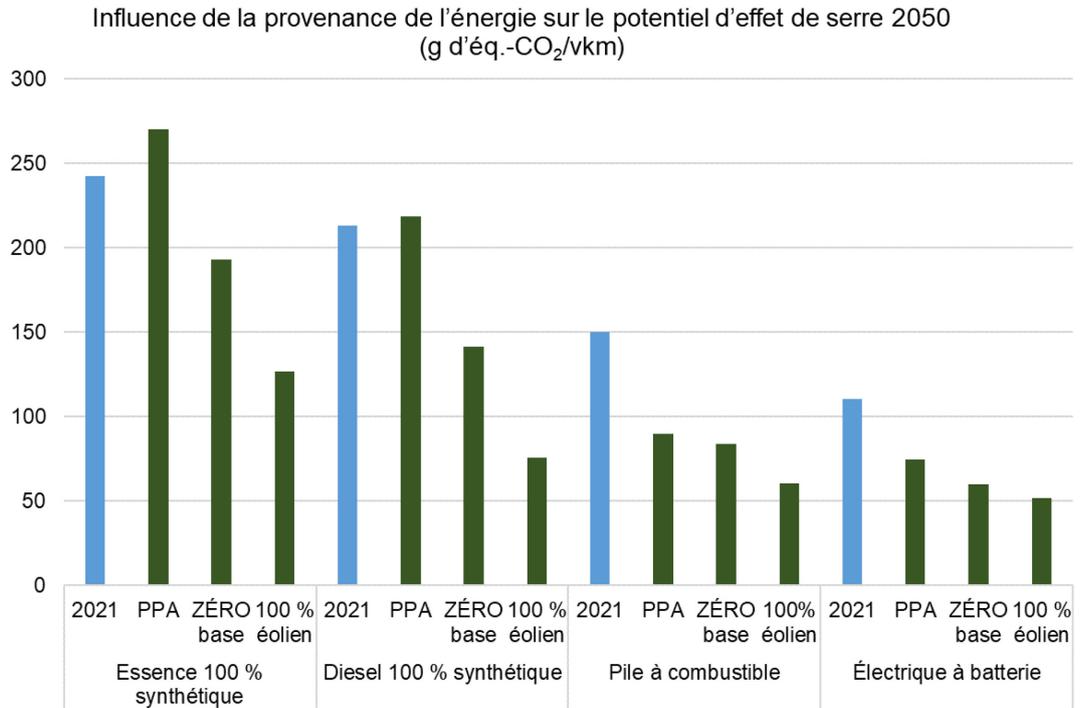


Figure 13 : Influence de la provenance de l'énergie sur le potentiel d'effet de serre de différentes technologies de propulsion

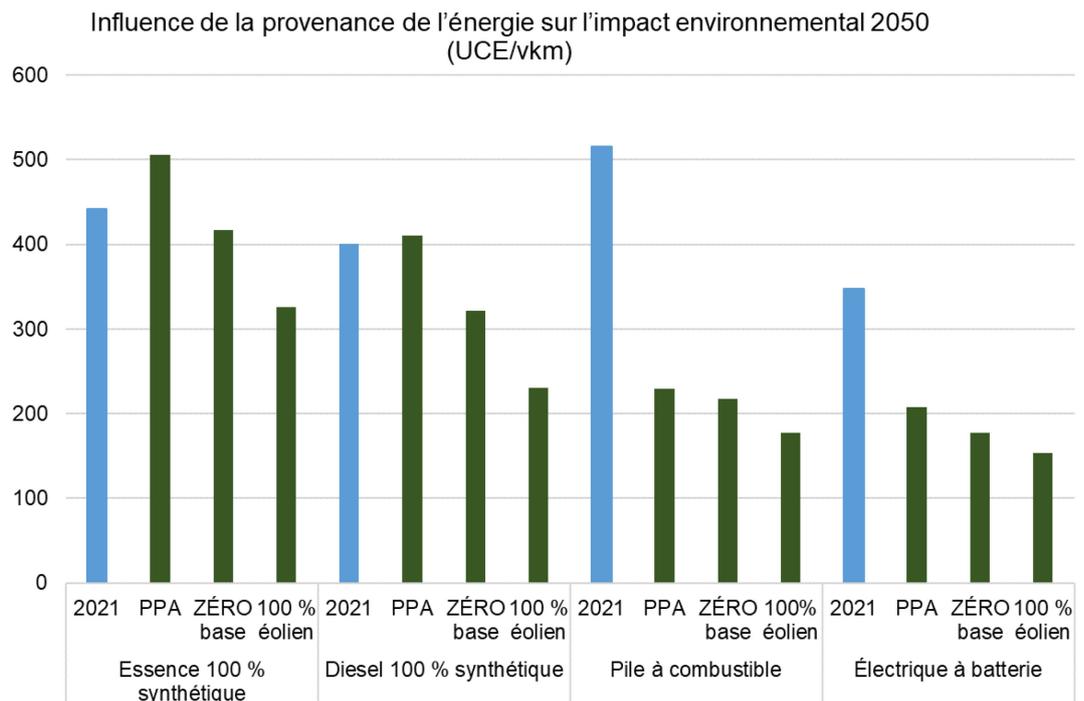


Figure 14 : Influence de la provenance de l'énergie sur l'impact environnemental en UCE de différentes technologies de propulsion

Les différences entre l'essence synthétique (procédé de synthèse du méthanol) et le diesel synthétique (procédé Fischer-Tropsch) s'expliquent principalement par le fait que les processus de fabrication impliquent plusieurs produits et que les deux procédés génèrent plusieurs hydrocarbures (en proportions diverses) avec des recettes financières différentes. Dès lors, l'infrastructure nécessaire, l'énergie requise et les émissions impliquées dans ces processus ne peuvent pas être directement imputées à un seul produit, raison pour laquelle il est nécessaire de procéder à une allocation dans les inventaires. Cette allocation est effectuée selon une approche économique, qui fait que l'on utilise des facteurs d'allocation différents pour l'essence et pour le diesel synthétiques (cf. tableaux à l'annexe 7.4). Vu que la fabrication de carburants synthétiques est très gourmande en énergie primaire, le rendement légèrement plus élevé du moteur diesel influence aussi le résultat. À l'heure actuelle, il est très difficile d'évaluer comment le processus de fabrication des carburants synthétiques se développera, tant sur le plan des produits que sur celui des recettes. La représentation des deux carburants synthétiques, qui sont chacun fabriqués au moyen de processus différents, donne une idée approximative de l'effet de l'allocation sur le résultat par vkm. Alors que dans le scénario ZÉRO base, l'essence synthétique est fabriquée avec 97 % d'énergie renouvelable, le potentiel d'effet de serre du véhicule à essence synthétique de 2050 n'est inférieur que de 20 % à celui du véhicule à essence de 2021. C'est seulement lorsque l'essence ou le diesel synthétiques sont fabriqués uniquement avec de l'électricité éolienne ou de l'électricité ayant un potentiel d'effet de serre similaire que les émissions de GES peuvent être nettement réduites par rapport à 2021 (- 48 % essence et - 64 % diesel).

Lorsque le carburant est fabriqué avec de l'électricité 100 % éolienne, les émissions de GES du véhicule ICE fonctionnant au diesel synthétique sont supérieures de 47 % à celles du BEV rechargé avec de l'électricité 100 % éolienne ; celles du véhicule ICE fonctionnant à l'essence synthétique sont pour leur part plus élevées d'un facteur 2,4. Dans tous les scénarios considérés, le FCEV et le BEV de 2050 ont des émissions de GES nettement plus basses que le véhicule fonctionnant avec de l'essence synthétique fabriquée avec de l'électricité 100 % éolienne.

L'évolution de l'impact environnemental global (en UCE) suit dans l'ensemble celle des émissions de GES. À noter toutefois que dans les scénarios PPA et ZÉRO base, l'utilisation de carburants synthétiques n'entraîne soit aucune soit qu'une faible réduction de l'impact environnemental global par rapport au BEV de 2021. Lorsque les carburants synthétiques sont fabriqués uniquement avec de l'énergie éolienne, leur impact environnemental peut être jusqu'à 34 % plus bas (véhicule diesel) que celui du BEV de 2021. La réduction de l'impact environnemental global du FCEV se situe entre 55 % (PPA) et 66 % (100 % énergie éolienne) par rapport à 2021, celle du BEV entre 40 et 56 %.

4 Interprétation des résultats et analyses de sensibilité supplémentaires

4.1 Comparaison avec d'autres écobilans de voitures de tourisme

Comme la plupart des études qui comparent les véhicules en fonction de leur système de propulsion examinent les émissions de GES générées par ces derniers, cette section porte en premier lieu sur les incidences climatiques, exprimées en éq.-CO₂. Elle présente les principaux résultats de cinq études sélectionnées ainsi que leurs différences avec le présent rapport. Deux études publiées en Suisse il y a quelques années (treeze (2018), PSI (2020)) et trois études actuelles sont examinées (ICCT (2022), Wietschel et. al. (2022), (IPCC, 2022)). Les potentiels de réduction des propulsions alternatives examinées par rapport à un véhicule ICE à essence sont présentés dans le tableau 10.

« **Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien** » (Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022). Cette étude allemande a été réalisée par le Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI et l'Ifeu-Institut für Energie und Umwelttechnik Heidelberg GmbH sur mandat de l'Expertenkommission Forschung und Innovation. Au niveau du contenu, l'étude se concentre sur l'impact environnemental ainsi que sur le rendement des différents systèmes de propulsion, aujourd'hui et à l'avenir. Elle inclut aussi les véhicules ICE fonctionnant à l'essence synthétique et au biogaz. L'impact environnemental décrit comprend les émissions de GES, les émissions de polluants atmosphériques et la consommation de matières premières critiques. L'étude n'agrège pas les différentes incidences sur l'environnement comme le fait le présent rapport à l'aide des UCE. Selon l'étude, les BEV présentent le plus important potentiel en matière de réduction des émissions de GES, en particulier à court terme (jusqu'en 2030). Les PHEV génèrent moins d'émissions seulement lorsque la part d'utilisation en mode tout électrique est élevée. Selon l'étude, les véhicules ICE qui roulent au biogaz pourraient générer aussi peu d'émissions de GES qu'un BEV, mais les auteurs jugent l'utilisation du biogaz d'un œil critique, en particulier sur le long terme, en raison de sa disponibilité limitée. Les e-carburants (hydrogène, essence synthétique) produits avec de l'électricité 100 % renouvelable permettent de générer aussi peu d'émissions de GES qu'un BEV rechargé avec du courant renouvelable. Par contre, lorsque les e-carburants sont fabriqués avec le mix électrique allemand (2019), les émissions du FCEV sont à peu près les mêmes que celles de l'ICE à essence fossile, tandis que celles des véhicules fonctionnant avec de l'essence synthétique sont plus élevées de 60 %. L'étude estime par conséquent que les carburants de synthèse considérés ne conviennent pas pour réduire à court terme les émissions de GES des voitures de tourisme. Différences et points communs avec le présent rapport : le potentiel, en matière de réduction, des futurs carburants synthétiques fabriqués avec de l'électricité 100 % renouvelable est un peu plus élevé dans l'étude que le présent rapport. En outre, la différence sur le plan des émissions de GES entre les carburants synthétiques fabriqués avec le mix électrique allemand 2019 et ceux fabriqués avec de l'énergie 100 % renouvelable est nettement plus importante dans l'étude que dans le présent rapport. Dans les deux publications, ce sont les BEV qui sont le moins sensibles à l'origine de l'énergie. Parmi les autres aspects comparables, on peut citer la durée de vie kilométrique des véhicules (187 500 km) et l'influence de la part d'utilisation en mode tout électrique pour les PHEV. Dans les deux publications, les PHEV ne permettent de réduire les émissions de GES que si l'on part de l'hypothèse qu'ils sont fréquemment rechargés.

« **More bang for the buck: A comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany** » (ICCT, 2022). L'étude réalisée sur mandat de l'International Council on Clean Transportation (ICCT) porte sur l'efficacité des subventions en faveur des PHEV et des BEV en Allemagne. Dans la première partie, les émissions de GES d'une sélection de PHEV et de BEV sont comparées à celles de véhicules ICE (essence et diesel). Dans la deuxième partie, l'efficacité des subventions est évaluée à l'aune de la réduction des émissions de GES réalisée ; ce point n'est pas approfondi ici. Selon l'étude, les émissions de GES des BEV sont inférieures de 63 % en moyenne à celles du véhicule ICE à essence. Dans le cas des PHEV, la réduction des émissions de GES est de 34 % en moyenne, mais elle dépend fortement de la part d'utilisation en mode tout électrique.

Considérés séparément, les PHEV présentent des réductions comprises entre 10 et 52 % par rapport au véhicule ICE à essence. Pour les futurs véhicules (2030), l'étude prévoit une réduction des émissions de GES de 74 à 80 % (BEV) et de 40 à 63 % (PHEV) par rapport au véhicule ICE à essence. Différences et points communs avec le présent rapport : la principale différence concerne la plus longue durée de vie kilométrique (240 000 km) utilisée pour tous les véhicules dans l'étude, ce qui a aussi une incidence sur les résultats. L'étude part d'émissions de GES un peu plus basses pour la fabrication des batteries des BEV, mais elle applique pour l'usage des véhicules le mix électrique allemand 2020, qui a un impact carbone plus élevé que le mix consommateur suisse 2018 utilisé dans le présent rapport. Ces deux aspects se compensent en grande partie. Si les deux études utilisaient la même durée de vie kilométrique, on obtiendrait pratiquement les mêmes résultats en valeur absolue.

« **IPCC Sixth Assessment Report. Chapter 10: Transport** » (IPCC, 2022). Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) évalue les progrès réalisés en vue de limiter les émissions et la palette des options d'atténuation possibles dans les systèmes énergétiques et les villes ainsi que dans les secteurs tels que l'agriculture et la sylviculture, l'utilisation des sols, les bâtiments, les transports et l'industrie. Pour le secteur des transports, le rapport fournit un aperçu des émissions de GES globales sur l'ensemble du cycle de vie pour les différentes technologies de propulsion. La durée de vie kilométrique utilisée est de 180 000 km. Selon le rapport, ce sont les BEV rechargés avec du courant renouvelable qui présentent le plus important potentiel en matière de réduction des émissions de GES (- 61 %). Différences et points communs avec le présent rapport : la différence la plus frappante est que, dans le rapport du GIEC, les véhicules ICE qui fonctionnent au diesel génèrent plus d'émissions de GES que ceux roulant à l'essence. En ce qui concerne les propulsions purement électriques (FCEV, BEV), le rapport du GIEC ne contient pas de mix électrique qui permettrait une comparaison. Les résultats du rapport du GIEC en ce qui concerne les émissions de GES des FCEV et des BEV fonctionnant avec de l'électricité renouvelable sont en revanche presque identiques à ceux du présent rapport.

« **Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos** » (treeze, 2018). L'étude réalisée en 2012 sur mandat de l'OFEV a été actualisée en 2018. En plus des émissions de GES, elle calcule l'impact environnemental agrégé exprimé en UCE. Les valeurs obtenues dans l'étude ne peuvent toutefois pas être directement comparées avec les chiffres du présent rapport, car les UCE ont entretemps aussi été actualisés. L'étude conclut également que le BEV génère moins d'émissions de GES que les autres types de propulsion. Selon elle, le BEV a par contre un impact environnemental agrégé (en UCE) plus élevé que celui de la moyenne du parc des véhicules à essence, du véhicule diesel le plus performant sur le plan environnemental et des véhicules hybrides. Différences et points communs avec le présent rapport : l'étude de treeze diffère principalement du présent rapport sur deux hypothèses. D'une part, l'étude suppose que la batterie d'un BEV sur deux doit être remplacée au cours de la durée de vie, ce qui revient à compter 1,5 batterie par BEV. D'autre part, elle se fonde sur d'anciens inventaires, dans lesquels la fabrication de la batterie est modélisée avec une consommation d'énergie plus élevée. Comme en outre le mix électrique utilisé pour la fabrication de la batterie contient une part élevée d'électricité produite à partir de charbon, l'impact environnemental global des BEV est comparativement élevé.

« **Incidences environnementales des voitures de tourisme – Aujourd'hui et demain** » (PSI, 2020). La fiche d'information de l'IPS a été établie sur mandat de l'OFEN et se base sur les données de l'IPS disponibles sous <https://calculator.psi.ch>. Elle compare les émissions de GES ainsi qu'un choix d'indicateurs environnementaux pour différents véhicules sur l'ensemble de la durée de vie de ces derniers. Elle n'agrège pas les différentes atteintes environnementales comme le fait le présent rapport avec les UCE. En plus de l'examen des différentes technologies de propulsion en 2018, la fiche d'information présente également un bilan prévisionnel de l'année 2040. Selon la fiche d'information, ce sont les BEV qui ont le plus grand potentiel en matière de réduction des émissions de GES. Les FCEV offrent également un potentiel de réduction, mais il est moins important et exige que l'hydrogène soit produit avec de l'énergie renouvelable. Une

certaines améliorations par rapport à 2018 est attendue en 2040 pour tous les types de propulsion. Différences et points communs avec le présent rapport : la fiche d'information part d'une même durée de vie kilométrique (200 000 km) que le présent rapport. Même si, dans la fiche d'information, le BEV est équipé d'une batterie de plus petite taille (36 kWh), les deux publications concluent que l'impact environnemental plus élevé dû à la fabrication des BEV est compensé après environ 30 000 km par les plus faibles émissions de GES. Cette conclusion similaire s'explique par le fait que le présent rapport utilise des données d'inventaire actualisées.

Les études examinées partant d'hypothèses en partie différentes, il ne sert à rien de comparer leurs résultats chiffrés avec ceux du présent rapport. Cependant, les tendances et les conclusions des études les plus récentes (ICCT, 2022), (Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022) rejoignent celles du présent rapport. Le classement des systèmes de propulsion en fonction de leur impact sur l'environnement est ainsi majoritairement le même d'une étude à l'autre. Les hypothèses concernant la fabrication et la durée de vie des batteries ont beaucoup changé par rapport à celles retenues dans la plus ancienne étude prise en compte (treeze, 2018).

Tableau 12 : Potentiels en matière de réduction des émissions de GES par rapport au véhicule de référence (essence) dans les études sélectionnées (n. d. : non disponible)

Propulsion	Présent rapport OFEV 2023	(Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022)	(ICCT, 2022) ¹¹	GIEC	(PSI, 2020)	(treeze, 2018)
ICE essence	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
ICE diesel	- 12 %	- 9 %	- 7 %	+ 13 %	- 20 %	- 5 %
HEV essence	- 76 %	n. d.	- 20 %	- 9 %	n. d.	- 16 %
PHEV essence	- 33 %	- 23 %	- 34 %	n. d.	n. d.	- 31 %
FCEV mix électrique (renouvelable)	- 38 % (- 66 %)	+ 2 % (- 52 %)	- 23 % (- 78 %)	- 2 % ¹² (- 56 %)	- 36 % (- 43 %)	n. d.
BEV mix électrique (renouvelable)	- 55 % (- 65 %)	- 46 % (- 66 %)	- 63 % (- 80 %)	- 18 % ¹³ (- 61 %)	- 58 % (- 62 %)	- 44 % (- 55 %)

4.2 Aspects spécifiques relatifs aux véhicules actuels

Comme mentionné précédemment, les inventaires établis et les systèmes examinés contiennent une multiplicité d'hypothèses (p. ex. sur l'électricité utilisée) qui peuvent influencer considérablement les résultats de tous les véhicules ou de certains d'entre eux. Il convient par conséquent de considérer de plus près les aspects suivants :

- la technologie de production de l'électricité ;
- la part d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale.

À noter encore que les résultats présentés dans cette section valent pour un certain profil d'utilisation des véhicules. Par exemple, aussi longtemps que la batterie ne doit pas être changée, une durée de vie kilométrique plus longue réduit l'impact environnemental par vkm d'un BEV et rend ce dernier encore plus performant sur le plan environnemental par rapport aux voitures de tourisme munies d'un moteur à combustion. Comme les profils d'utilisation des voitures de tourisme

¹¹ Les données pour les FCEV et les HEV proviennent d'une étude antérieure de ICCT (Bieker, 2021).

¹² Difficilement comparable, puisque l'hydrogène est obtenu par reformage du méthane à la vapeur (*Stream Methane Reforming*) et non avec un mix électrique.

¹³ Difficilement comparable, puisque le courant de recharge provient d'une centrale à gaz et non du mix électrique.

peuvent fortement varier, il faut toujours tenir compte des hypothèses retenues lorsqu'on évalue un écobilan. Pour évaluer un cas concret, on pourra entrer le profil d'utilisation correspondant dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

4.2.1 Influence de la technologie de production de l'électricité utilisée pour fournir l'énergie de propulsion

Cette section examine l'influence de l'origine de l'électricité utilisée pour fournir l'énergie de propulsion électrique ; concrètement, elle se penche sur l'origine du courant de recharge des BEV et de l'électricité utilisée pour fabriquer l'hydrogène pour les FCEV. Les résultats présentés sont ceux obtenus pour les véhicules de catégorie moyenne de l'année 2021. Le véhicule fonctionnant avec de l'essence synthétique n'est pas représenté, vu que les carburants synthétiques produits avec de l'électricité ne sont actuellement pas disponibles en grandes quantités sur le marché. À cet égard, il convient cependant de noter que, indépendamment de l'origine du courant, l'impact environnemental par vkm des véhicules roulant avec de tels carburants synthétiques ne serait en aucun cas inférieur à celui d'un FCEV, vu que la fabrication des carburants liquides génère d'autres pertes et que le moteur à combustion transforme l'énergie de manière moins efficace. La figure 15 présente l'impact environnemental global (ventilé par catégorie d'impact), les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (ventilée par source d'énergie).

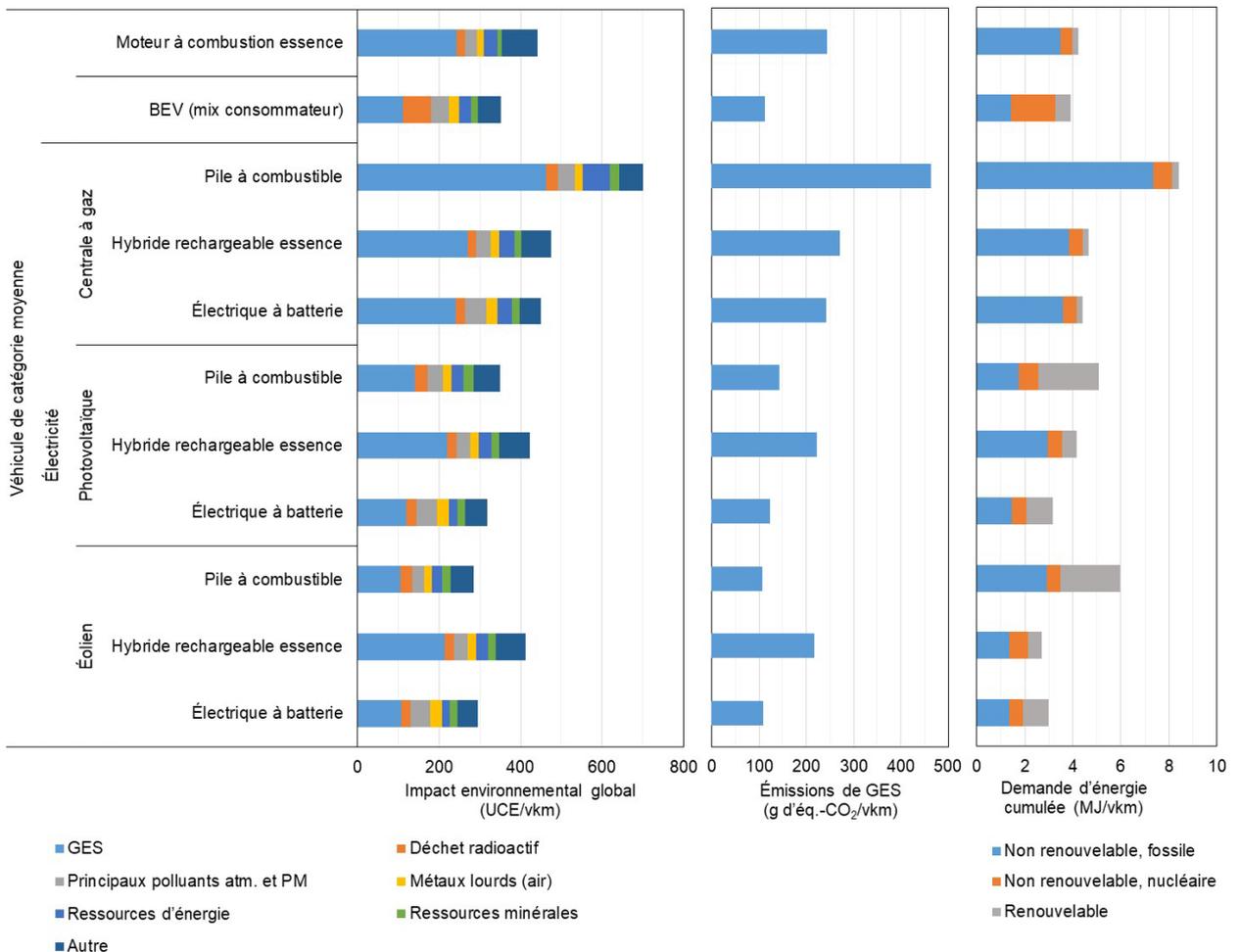


Figure 15 : Influence de l'origine de l'électricité utilisée sur l'impact environnemental global (ventilé selon la catégorie d'impact), les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (ventilée selon la source d'énergie)

Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Les GES jouent un rôle important dans l'impact environnemental global de tous les véhicules représentés. Plus les émissions de GES générées par la production de l'énergie de propulsion

sont faibles, plus la part des autres émissions et des ressources consommées dans l'impact environnemental global est élevée. Il s'agit ici surtout des émissions de polluants atmosphériques générées par les processus en amont et des ressources primaires utilisées. Les trois indicateurs (impact environnemental global, émissions de GES et demande d'énergie cumulée) présentent un tableau à peu près similaire, à l'exception des FCEV, dont la demande d'énergie cumulée reste élevée même avec des agents énergétiques renouvelables du fait des pertes énergétiques lors de la production de l'hydrogène.

Lorsque l'électricité utilisée provient de centrales thermiques à gaz naturel (ci-après : « centrales à gaz »), les émissions de GES et les UCE du BEV et du PHEV sont à peu près au même niveau que celles du véhicule à essence. Les émissions de GES et les UCE du BEV sont légèrement inférieures à celles du véhicule à essence, celles du PHEV légèrement supérieures. S'agissant du FCEV, l'utilisation d'électricité provenant d'une centrale à gaz entraînerait des émissions de GES et un impact environnemental nettement plus élevés que ceux d'un véhicule ICE. Un BEV qui est rechargé seulement avec du courant renouvelable tel que celui produit par les installations photovoltaïques ou les éoliennes actuelles génère un impact environnemental global inférieur de respectivement 9 et 16 % à celui d'un BEV rechargé avec le mix consommateur. La réduction du potentiel de GES par rapport à un véhicule à essence est de respectivement 50 et 56 % et celle de l'impact environnemental global de 28 et 33 %. Si l'hydrogène était produit avec de l'électricité renouvelable, le FCEV aurait un impact environnemental de 3 % moins élevé (éolien) ou 10 % plus élevé (PV) que celui du BEV comparable et des émissions de GES inférieures de 3 % (éolien) ou supérieures de 16 % (PV).

L'influence de l'origine de l'électricité dépend fortement du rendement global du système de propulsion. Plus l'énergie électrique est utilisée efficacement, plus l'influence de sa production sur les résultats par vkm diminue. Lorsqu'un BEV est rechargé avec du courant provenant d'une centrale à gaz au lieu d'une source éolienne, son potentiel d'effet de serre s'accroît de 133 g d'éq.-CO₂ par vkm (soit d'un facteur 2,2). Dans le cas du FCEV, le potentiel d'effet de serre augmente par contre de 357 g d'éq.-CO₂ par vkm (facteur 3,4) en raison du moins bon rendement global.

4.2.2 Influence de la part d'utilisation en mode tout électrique pour les PHEV

Comme déjà indiqué précédemment (cf. 3.1), les émissions directes dues à la combustion des carburants fossiles représentent la part la plus importante de l'impact environnemental des véhicules équipés d'un moteur à combustion. Dans le cas des PHEV, leur impact sur l'environnement dépend ainsi dans une large mesure de la fréquence à laquelle ils roulent uniquement à l'électricité. Cette part d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale est désignée par ce qu'on appelle le « facteur d'utilité » (*Utility Factor*, UF) et exprimée en pour-cent. Plus le véhicule est fréquemment rechargé et utilisé en mode tout électrique, plus l'UF est élevé. L'UF utilisé pour les PHEV modélisés pour 2021 est de 47 % (cf. tab. 3). Cette valeur s'inspire d'une étude de l'ICCT (Plötz, et al., 2022) basée sur les données de 5808 particuliers en Europe (principalement en Allemagne) utilisant des PHEV construits entre 2011 et 2021. Selon cette étude, l'UF moyen pour ces PHEV se situe entre 45 et 49 % selon la catégorie du véhicule. La figure 16 présente, en plus des résultats obtenus avec l'UF de 47 %, les valeurs obtenues pour un scénario dans lequel le PHEV n'est jamais rechargé avec une source externe.

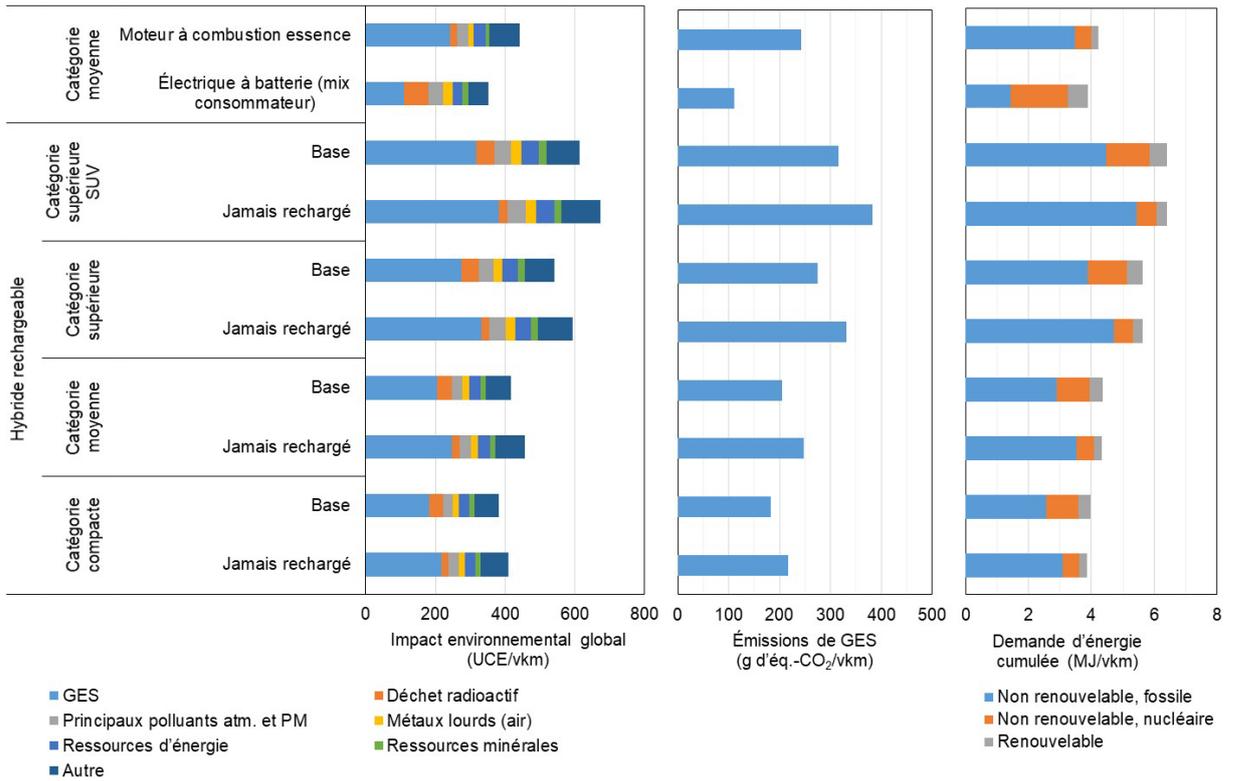


Figure 16 : Influence de l'UF (pourcentage d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale) pour les PHEV

Mix CH = mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

Avec l'UF retenu (cf. barres sous « Base » à la fig. 16), la réduction réalisée par les PHEV en matière d'émissions de GES et d'impact environnemental global par rapport aux véhicules à essence de même catégorie est minime. Lorsqu'ils ne sont jamais rechargés avec une source externe, ces PHEV ont par contre un impact environnemental et des émissions de GES supérieur à ceux des véhicules à essence de même catégorie (respectivement + 3 et + 2 %) en raison de leur poids plus élevé. L'impact environnemental d'un PHEV de catégorie moyenne jamais rechargé est supérieur de 30 % à celui du BEV de même catégorie et son potentiel d'effet de serre, d'environ 120 %. L'impact environnemental lié à un usage déterminé du véhicule peut désormais être évalué en entrant l'UF dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

4.3 Influence de la méthode d'évaluation

Le choix de la méthode d'évaluation de l'impact peut aussi avoir une incidence sur le classement des véhicules. Comme mentionné précédemment (cf. 2.3.3), il n'existe pas de méthode d'évaluation de l'impact qui tienne compte de tous les aspects qui jouent un rôle sur le plan environnemental. Chaque méthode a ses points forts et ses points faibles. L'utilisation de différentes méthodes d'évaluation permet de vérifier si les résultats dépendent fortement de l'outil employé. Si c'est le cas, les différences doivent être examinées et le choix des différentes approches utilisées doit être justifié. On a vu ci-dessus (cf. 2.2) que la méthode de la saturation écologique intègre aussi dans son évaluation les objectifs politiques fixés pour les différents domaines environnementaux. D'autres méthodes s'appuient sur une modélisation des dommages ; elles procèdent aussi à une agrégation totale, mais sans prendre en compte les objectifs politiques. Afin de faciliter l'interprétation des résultats présentés dans ce rapport, la figure 17 montre l'impact environnemental de véhicules de catégorie moyenne équipés de différentes technologies de propulsion selon la méthode de la saturation écologique et selon la méthode Impact2002+ (dans la version 2.15 de 2018, cf. 2.2). Bien que les méthodes n'utilisent pas les mêmes critères d'évaluation, leurs résultats montrent des différences relatives très similaires et classent les technologies

de propulsion de façon presque identique. On notera cependant une différence en ce qui concerne le BEV et le FCEV lorsque l'énergie de propulsion (courant de recharge et production de l'hydrogène) provient d'une source renouvelable. Cette différence est due au fait que les deux méthodes n'intègrent pas systématiquement les mêmes données dans leur inventaire respectif (p. ex. les émissions de certains polluants atmosphériques). Ainsi, ces flux de données qui ne sont pas évalués dans la méthode Impact2002+ représentent 26 % de l'impact environnemental global des BEV et 44 % de celui des FCEV dans la méthode de la saturation écologique. Deux de ces flux, pour lesquels il existe des différences marquées entre les deux modes de propulsion, doivent surtout être mentionnés : les capacités de décharge nécessaires pour l'élimination des déchets radioactifs et d'autres déchets, d'une part, et la ressource que constitue le platine, d'autre part. Les flux non pris en compte dans la méthode de la saturation écologique représentent quant à eux 8 % (BEV) et 4 % (FCEV) des atteintes environnementales déterminées par la méthode Impact2002+. La différence entre les systèmes de propulsion est dans ce cas cependant beaucoup moins marquée.

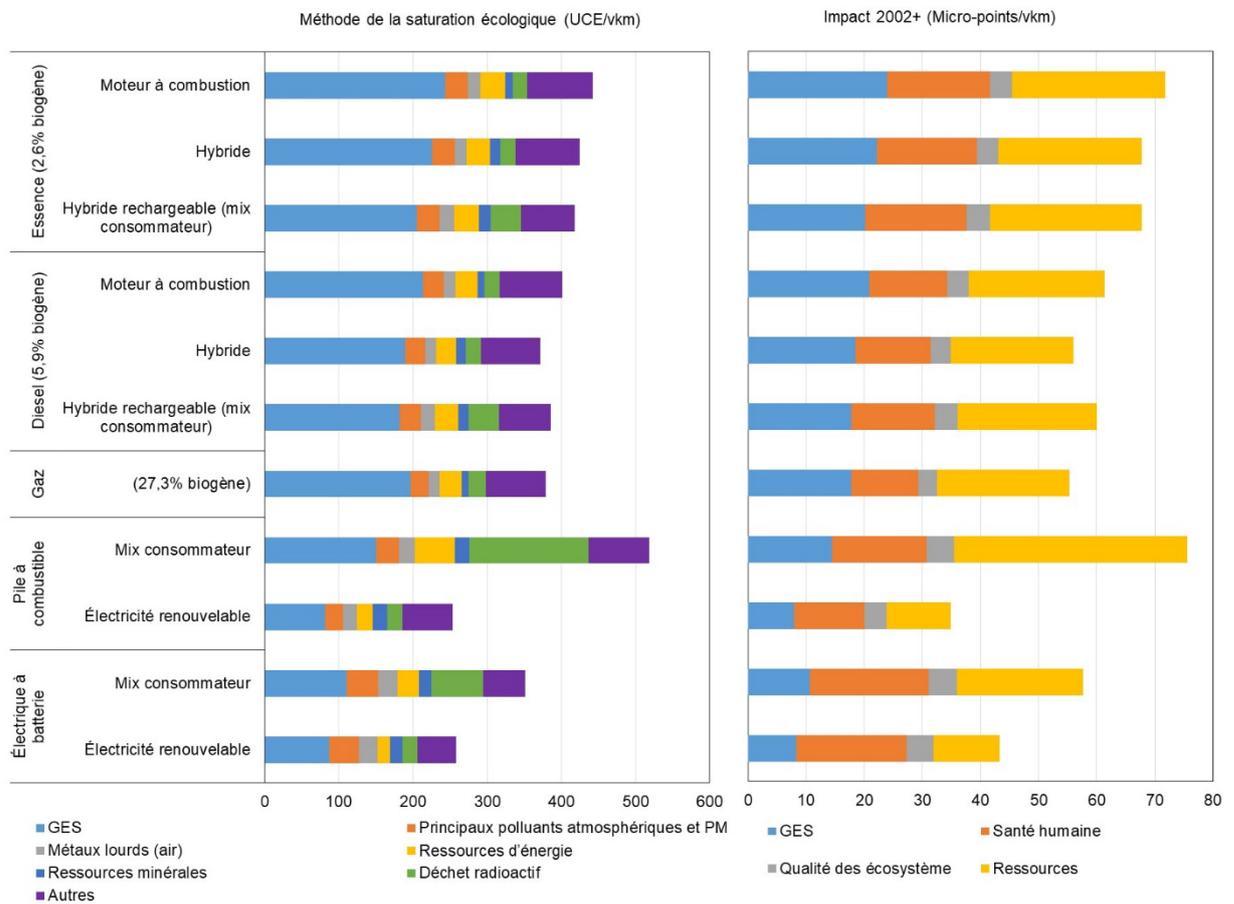


Figure 17 : Influence de la méthode d'évaluation de l'impact utilisée (véhicule de catégorie moyenne)
 Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)
 Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)

4.4 Aspects spécifiques relatifs aux futurs véhicules

Cette section examine certains potentiels de développement spécifiques aux BEV (accroissement de la durée de vie kilométrique, réutilisation des batteries [seconde vie], augmentation de la part des substances recyclées dans la batterie [cf. tab. 6] et batterie plus légère). Ce faisant, elle complète la présentation des potentiels de développement dans les scénarios PPA et ZÉRO base (cf. 3.5). Comme déjà indiqué précédemment, ces analyses prospectives ne prennent pas en considération les développements potentiels que pourraient connaître les processus en

amont, par exemple la fabrication de l'acier. Il se pourrait donc que les prévisions tendent à surévaluer l'impact environnemental des véhicules considérés ci-dessous.

Les figures 18 et 19 montrent les effets qu'ont les potentiels de développement des BEV décrits dans la section 2.4. Le véhicule de référence est un BEV de catégorie moyenne rechargé avec le mix consommateur. Les différentes couleurs indiquent l'influence des paramètres étudiés en 2030, 2040 et 2050 dans le scénario ZÉRO base.

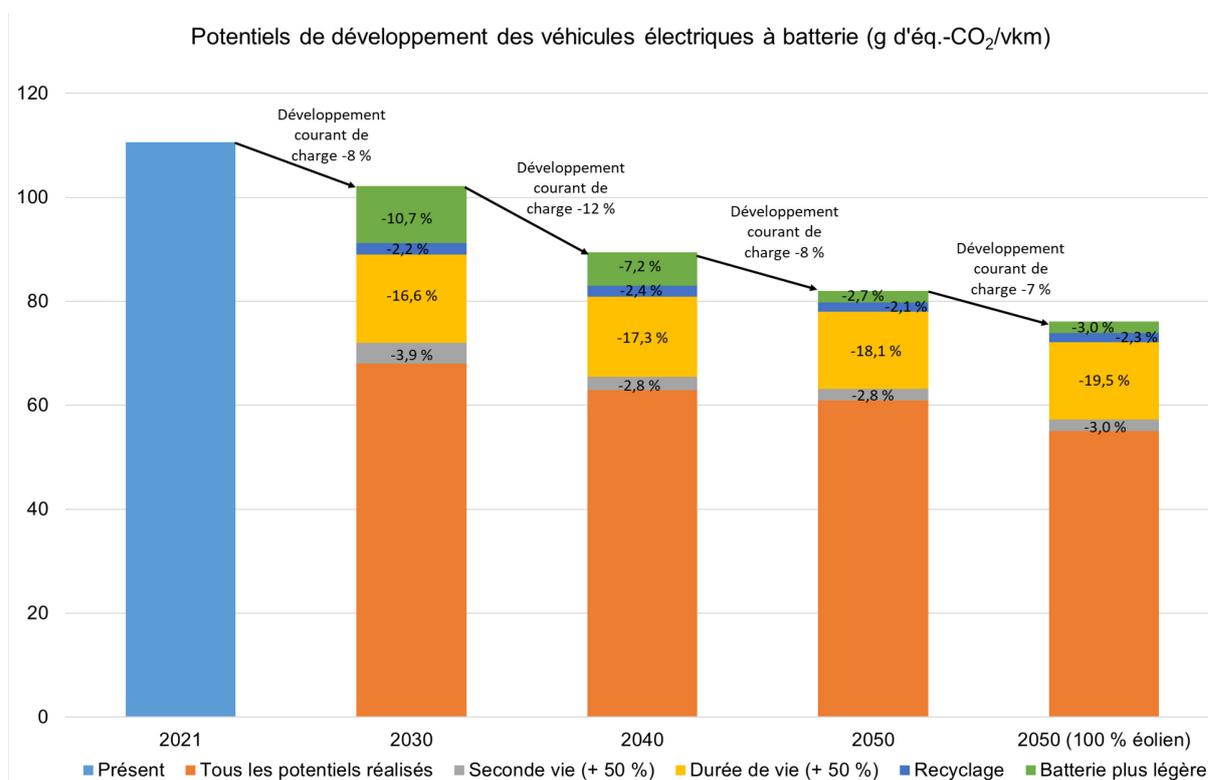


Figure 18 : Potentiels de développement des BEV dans le scénario ZÉRO base (GES)

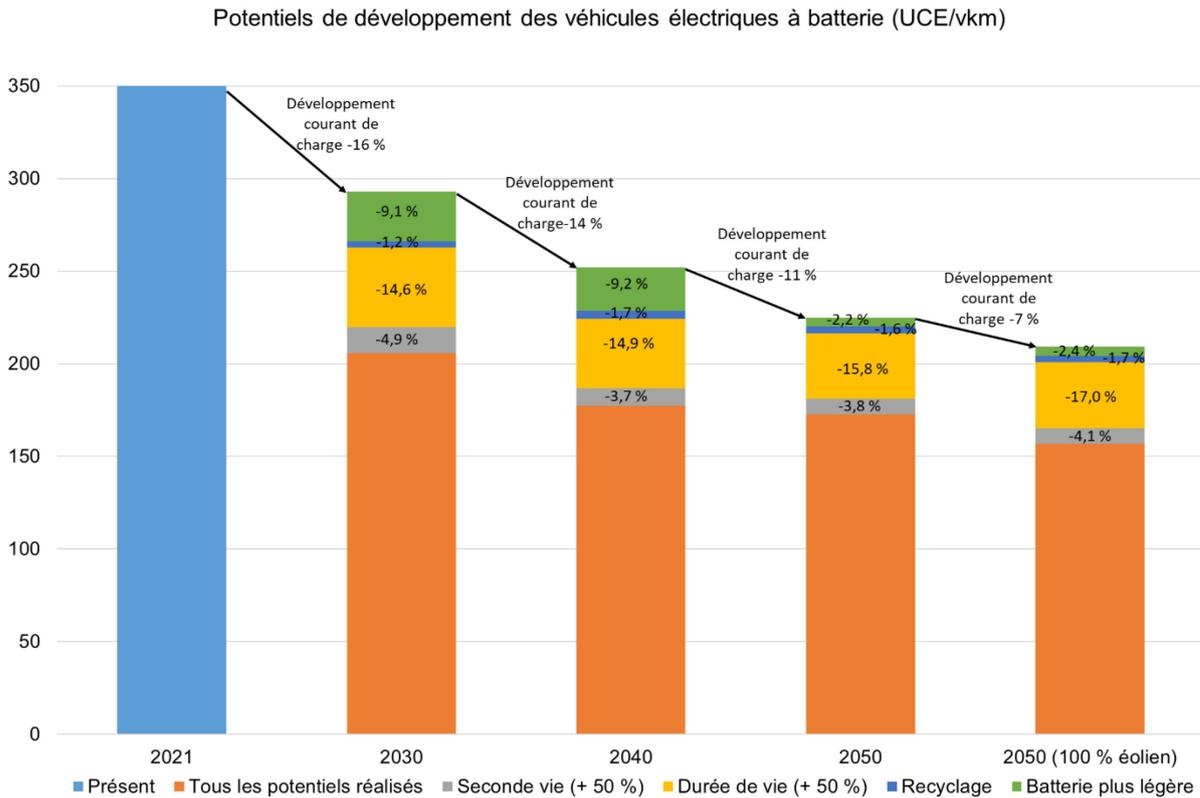


Figure 19 : Potentiels de développement des BEV dans le scénario ZÉRO base (UCE)

Le plus grand potentiel de réduction, tant sur le plan des émissions de GES que sur celui de l'impact environnemental global, réside dans l'allongement de l'utilisation du véhicule (jaune), soit une durée de vie kilométrique supposée de 300 000 km au lieu de 200 000 km (+ 50 %). Le développement du mix électrique utilisé devrait aussi permettre d'améliorer la performance environnementale du BEV. Exemple de lecture (fig. 19) : la colonne 2030 complète, c'est-à-dire sans soustraction des quatre potentiels de réduction représentés, correspond au véhicule de 2021 rechargé avec le mix électrique de 2030. La surface orange correspond à l'impact environnemental global (en UCE) du BEV de 2030 lorsque tous les potentiels de réduction sont exploités. Les différents potentiels de réduction pour le BEV de 2030 sont les suivants : utilisation des batteries pour le stockage après le retrait du véhicule de la circulation - 4,9 % (seconde vie, gris), allongement de l'utilisation du véhicule - 14,6 % (jaune), augmentation de la part des substances recyclées dans la batterie - 1,2 % (bleu) et batterie plus légère - 9,1 % (vert).

Si tous les potentiels de réduction déploient leur effet, les émissions de GES peuvent être réduites d'encre 30 % par rapport au scénario ZÉRO base représenté à la figure 11. L'impact environnemental global peut être réduit de 28 %.

L'effet de la demande accrue en ressources primaires n'est pas modélisé, car il est difficile à évaluer. Si cette demande accrue ne peut être couverte par des matières premières secondaires issues du recyclage, des sources supplémentaires devront être exploitées, ce qui pourrait générer des nuisances environnementales supplémentaires. Cet aspect n'étant pas pris en compte, l'effet du recyclage a tendance à être sous-évalué. Comme la modélisation part de l'hypothèse qu'il faudra toujours moins de matériaux pour fabriquer les batteries et que le mix électrique utilisé s'améliorera continuellement (c.-à-d. que la part renouvelable augmentera), l'effet du recyclage sur l'impact environnemental des véhicules diminue au fil du temps. L'influence du recyclage est tout de même nettement visible au niveau des cellules de batterie, comme le montre la figure 20 pour différentes catégories d'impact. Elle présente l'impact environnemental des quatre cellules de batterie (NMC) suivantes en 2050 :

- la cellule de batterie du scénario PPA sans recyclage (PPA 2050) ;
- la même cellule, sans recyclage, mais fabriquée avec le mix électrique du scénario ZÉRO base (+ mix élec. ZÉRO base) ;
- seconde cellule de batterie, mais avec les parts de recyclage suivantes retenues dans le scénario ZÉRO base : lithium 28 %, nickel 23 % et cobalt 67 % (+ recyclage ZÉRO base) ;
- seconde cellule de batterie, mais avec du lithium, du nickel et du cobalt 100 % recyclés (+ 100 % recyclage).

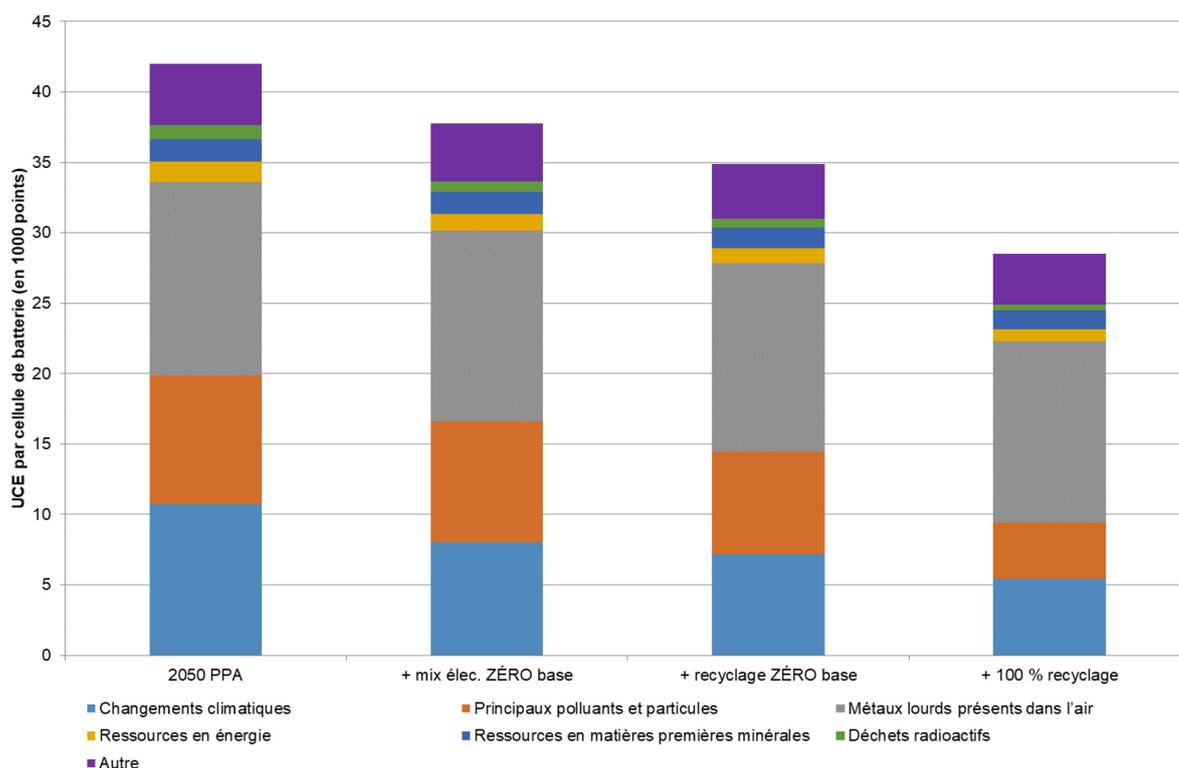


Figure 20 : Impact environnemental d'une cellule de batterie (NMC) par catégorie d'impact

L'évaluation de l'impact environnemental au niveau des cellules de batterie montre que l'utilisation de lithium, de nickel et de cobalt entièrement recyclés (100 %) permet de réduire d'environ un tiers les atteintes à l'environnement liées à la fabrication des batteries (colonne tout à droite). Ces atteintes sont principalement dues aux émissions de métaux lourds dans l'air (gris), aux GES (bleu clair) et aux principaux polluants atmosphériques (orange). Comme le recyclage permet de consommer moins de ressources, une part accrue de matériaux recyclés permet de réduire en particulier les polluants atmosphériques et les émissions de GES générées.

5 Conclusions

Au vu des nouveaux inventaires et des résultats relatifs à l'impact environnemental global, aux émissions de GES et à la demande d'énergie cumulée présentés dans ce rapport, la comparaison des voitures de tourisme en fonction des différents systèmes de propulsion permet de faire les constats suivants :

- Les voitures de tourisme électriques à batterie génèrent aujourd'hui nettement moins d'**émissions de GES** que les voitures de tourisme comparables équipées d'un moteur à combustion. Les véhicules à pile à combustible dont l'hydrogène est produit avec de l'énergie renouvelable occasionnent à peu près la même quantité d'émissions de GES que les véhicules électriques à batterie.
- Sur le plan de l'**impact environnemental global**, mesuré en UCE, la différence entre les systèmes de propulsion – moteur à combustion contre moteur électrique – est moins marquée. Les voitures de tourisme qui génèrent le moins d'UCE sont les véhicules électriques à batterie rechargés avec du courant renouvelable, ainsi que les véhicules à pile à combustible fonctionnant avec de l'hydrogène produit avec de l'électricité 100 % renouvelable.
- Les voitures de tourisme électriques à batterie rechargées avec le mix consommateur ont un impact environnemental (en UCE) moindre que celles équipées d'un moteur à combustion (y c. les véhicules hybrides et les véhicules hybrides rechargeables).
- Les véhicules à pile à combustible qui fonctionnent avec de l'hydrogène produit avec le mix consommateur ont l'impact environnemental de loin le plus élevé. Leurs émissions de GES sont un peu plus basses que celles des véhicules équipés d'un moteur à combustion (y c. les véhicules hybrides et les véhicules hybrides rechargeables), mais elles sont plus élevées que celles des véhicules électriques à batterie rechargés avec le mix consommateur.
- La **demande d'énergie cumulée** des véhicules à pile à combustible dont l'hydrogène est produit avec le mix consommateur est environ deux fois plus élevée que celle des véhicules équipés d'un moteur à combustion ou des véhicules électriques à batterie rechargés avec le mix consommateur. Les voitures électriques à batterie rechargées avec du courant renouvelable sont les véhicules dont la demande d'énergie cumulée est la plus faible.

La comparaison des véhicules selon leur taille et leur poids montre que :

- Quel que soit le type de propulsion, les véhicules lourds génèrent plus d'émissions de GES et ont un impact environnemental global et une demande d'énergie cumulée plus élevés que les véhicules légers.
- Dans une même catégorie de poids, les voitures de tourisme électriques à batterie occasionnent moins d'émissions de GES et ont un impact environnemental global plus bas que tous les autres véhicules.

La comparaison des différents moyens de transport montre que :

- Quelle que soit la distance parcourue, les voitures de tourisme ont, indépendamment de leur type de propulsion, un impact environnemental beaucoup plus élevé que le train, le tram, le bus ou le vélo (électrique).

Les scénarios d'avenir examinés montrent que :

- Dans le scénario ZÉRO base, la réduction de l'impact environnemental global des voitures de tourisme électriques à batterie d'ici à 2050 est estimée à 38 %. La charge environnementale de ces véhicules sera alors beaucoup plus basse que celle des voitures équipées d'autres types de propulsion.
- Dans les scénarios examinés, les voitures de tourisme électriques à batterie génèrent moins d'émissions de GES que les voitures de tourisme comparables équipées d'autres technologies de propulsion.
- Le diesel synthétique fabriqué uniquement avec de l'énergie éolienne ou de l'électricité ayant un potentiel d'effet de serre similaire permet de nettement réduire les émissions de GES. Dans un tel cas de figure, les émissions de GES et l'impact environnemental global restent cependant supérieurs à ceux des véhicules de tourisme électriques à batterie rechargés avec du courant de même origine.
- Le plus grand potentiel en matière de réduction des GES pour les véhicules électriques à batterie réside – en plus du développement prévu du courant de recharge – dans l'allongement sensible de la durée de vie kilométrique.

Au vu de ces éléments, on peut conclure qu'il existe **différentes possibilités de réduire** l'impact environnemental global, les émissions de GES et la consommation d'énergie cumulée des voitures de tourisme :

1. Le potentiel de réduction le plus important réside dans le choix du moyen de transport : les transports publics et le vélo sont de loin les moyens de transport les plus respectueux de l'environnement, même si on les compare aux voitures de tourisme à propulsion alternative.
2. Pour un trajet en voiture de tourisme, le choix d'un système de propulsion à batterie électrique permet de nettement réduire l'atteinte à l'environnement par kilomètre par rapport aux autres systèmes de propulsion.
3. L'électricité renouvelable joue un rôle de premier plan, que ce soit pour recharger les batteries des véhicules, pour produire de l'hydrogène ou encore dans l'ensemble des processus en amont (construction des véhicules, infrastructures).
4. La taille et le poids des véhicules ont également une influence considérable.

L'allongement de la durée de vie kilométrique des véhicules électriques à batterie, la recharge régulière des véhicules hybrides rechargeables et l'optimisation du recyclage des matériaux selon les principes de l'économie circulaire constituent d'autres moyens de réduire l'impact des voitures de tourisme sur l'environnement.

Les données des inventaires de la Confédération doivent être continuellement actualisées afin de maintenir et d'améliorer la qualité des analyses du cycle de vie. Les données d'inventaire utilisées dans le cadre du présent rapport peuvent être exploitées à d'autres fins, par exemple dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch.

6 Listes

Liste des figures

Figure A1 : voir figure 5	5
Figure 1 : Évolution des émissions de GES dues au transport de personnes (voitures de tourisme, motocycles, car privés) depuis 1990, avec les indicateurs pertinents (parc de véhicules et prestation kilométrique des véhicules destinés au transport des personnes [km]). Les émissions de GES par prestation kilométrique des véhicules destinés au transport de personnes sont également indiquées (OFEV, 2022).....	10
Figure 2 : Nouvelles immatriculations de voitures de tourisme, par type de propulsion en 2022 (OFROU, 2022)	11
Figure 3 : Les quatre phases d'un écobilan, adaptation d'après ISO 14040	12
Figure 4 : Représentation schématique de la méthode de la saturation écologique	14
Figure 5 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2, valeurs chiffrées voir tab. 12) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %) Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables) Remarque : l'impact environnemental de véhicules donnés et un mix électrique individuel peuvent être évalués en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch . NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium NMC : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt LFP : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-fer-phosphate (LiFePO ₄)	25
Figure 6 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global (ventilé par catégories d'impact) par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %) Mix renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables) Remarque : l'impact environnemental de véhicules donnés et un mix électrique individuel peuvent être évalués en entrant les principaux paramètres dans le tableau Excel disponible sous www.mobitool.ch . NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium NMC : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt LFP : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-fer-phosphate (LiFePO ₄).....	27
Figure 7 : Émissions de GES, impact environnemental global (UCE) et demande d'énergie cumulée en fonction de la prestation kilométrique Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %) Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)	29
Figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (exemples de véhicules voir tab. 2, chimie de la batterie : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium [NCA]) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)	31
Figure 9 : Émissions de GES par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne (données voir tab. 18) NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium.....	33
Figure 10 : UCE par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne (données voir tab. 19) NCA : accumulateurs lithium-ion avec une cathode à base de lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium	34

Figure 11 : Potentiel d'effet de serre d'un véhicule de catégorie moyenne en fonction des différentes technologies de propulsion dans les scénarios PPA et ZÉRO base, en g d'éq.-CO ₂ * À partir de 2030, fabrication dans un pays voisin avec le mix électrique du pays (cf. annexe 7.3).....	35
Figure 12 : Impact environnemental global d'un véhicule de catégorie moyenne en fonction des différentes technologies de propulsion dans les scénarios PPA et ZÉRO base, en UCE * À partir de 2030, fabrication dans un pays voisin avec le mix électrique du pays (cf. annexe 7.3).....	36
Figure 13 : Influence de la provenance de l'énergie sur le potentiel d'effet de serre de différentes technologies de propulsion	37
Figure 14 : Influence de la provenance de l'énergie sur l'impact environnemental en UCE de différentes technologies de propulsion	37
Figure 15 : Influence de l'origine de l'électricité utilisée sur l'impact environnemental global (ventilé selon la catégorie d'impact), les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (ventilée selon la source d'énergie) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)	42
Figure 16 : Influence de l'UF (pourcentage d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale) pour les PHEV Mix CH = mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)	44
Figure 17 : Influence de la méthode d'évaluation de l'impact utilisée (véhicule de catégorie moyenne) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %) Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables).....	45
Figure 18 : Potentiels de développement des BEV dans le scénario ZÉRO base (GES)	46
Figure 19 : Potentiels de développement des BEV dans le scénario ZÉRO base (UCE)	47
Figure 20 : Impact environnemental d'une cellule de batterie (NMC) par catégorie d'impact	48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Sources des données utilisées pour établir les inventaires des véhicules	16
Tableau 2 : Catégories de véhicule selon (Sacchi & Bauer, 2021). Les véhicules électriques sont écrits en gras dans la colonne « Exemples »	17
Tableau 3 : Principales hypothèses par catégorie de véhicule (Sacchi & Bauer, 2021)	18
Tableau 4 : Mix consommateur suisse 2018 et électricité renouvelable sur la base de l'intégration des valeurs horaires de la production et des échanges commerciaux (Frischknecht, 2021).....	20
Tableau 5 : Impact environnemental en UCE, émissions de GES et demande d'énergie cumulée par kWh de l'électricité utilisée dans les inventaires selon la technologie de production et le mix	20
Tableau 6 : Différences entre les scénarios principaux PPA et ZÉRO base	21
Tableau 7 : Sources de données utilisées pour la modélisation des futurs véhicules	22
Tableau 8 : Paramètres étudiés pour les perspectives d'avenir	22
Tableau 9 : Émissions de GES des différentes catégories de véhicule par rapport au véhicule de catégorie moyenne.....	32
Tableau 10 : Potentiels en matière de réduction des émissions de GES par rapport au véhicule de référence (essence) dans les études sélectionnées (n. d. : non disponible).....	41
Tableau 11 : Principales hypothèses par catégorie de véhicule (Sacchi & Bauer, 2021)	57
Tableau 12 relatif à la figure A1 et la figure 5 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée par vkm de VT de catégorie moyenne	58
Tableau 13 relatif à la figure 6 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global (ventilé par catégories d'impact) par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2).	61

Tableau 14 relatif à la figure 7 : Émissions de GES, impact environnemental global (UCE) et demande d'énergie cumulée en fonction de la prestation kilométrique (Cat. Moyenne).....	62
Tableau 15 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur les émissions de GES (g d'éq.-CO ₂ /vkm).....	63
Tableau 16 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur l'impact environnemental global (UCE/vkm)	64
Tableau 17 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur la demande d'énergie cumulée (MJ/vkm).....	65
Tableau 18 relatif à la figure 9 : Potentiel d'effet de serre par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen. Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne	66
Tableau 19 relatif à la figure 10 : UCE par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen. Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne	67
Tableau 20 : Prestation kilométrique pour laquelle le véhicule considéré a le même impact environnemental que la VT de catégorie moyenne à essence. Au-delà de cette prestation, l'impact environnemental de la VT de catégorie moyenne à essence est supérieur à celui du véhicule considéré (figure 7).	68
Tableau 21 relatif à la figure 11 et à la figure 12).....	68
Tableau 22 relatif à la figure 13 et à la figure 14.....	69
Tableau 23 relatif à la figure 15 : Influence de l'origine de l'électricité utilisée sur l'impact environnemental global (ventilé selon la catégorie d'impact), les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (ventilée selon la source d'énergie).....	69
Tableau 24 relatif à la figure 16 : Influence du facteur d'utilité (UF, pourcentage d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale) pour les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) Mix CH = mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)	70
Tableau 25 relatif à la figure 17 : Influence de la méthode d'évaluation de l'impact utilisée (véhicule de catégorie moyenne) Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %). Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables).....	71
Tableau 26 relatif à la figure 18 et à la figure 19.....	72
Tableau 27 relatif à la figure 20.....	72
Tableau 28 : Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022).....	73
Tableau 29 : Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ).....	73
Tableau 30 : Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)	74
Tableau 31 : Electricity production mix for neighboring countries, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022).....	74
Tableau 32 : Allocation of Fischer-Tropsch syncrude production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic diesel product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)	75
Tableau 33 : Allocation of synthetic methanol production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic gasoline product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)	75

Bibliographie

- Albrecht, U., Schmidt, P., Weindorf, W., Wurster, R., & Zittel, W. (2013). *Kraftstoffstudie. Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen*. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV).
- Base de données DETEC. (2018). *Base de données du DETEC de 2018 se fondant sur les données d'écoinvent (version 2.2), avec données de l'inventaire du cycle de vie adaptées*. Von <https://db.ecoinvent.org/index.php>
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. ICCT.
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D., & Mutel, C. (2020). *Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios*. Applied Energy 269.
- Dornoff, J., Tietge, U., & Mock, P. (2020). *On The Way To 'Real World' CO2 Values: The European Passenger Car Market In Its First Year After Introducing The WLTP*. ICCT.
- ecoinvent report No. 3. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods (Simapro implementierten Version 1.09)*. St. Gallen: ecoinvent.
- EMIS. (2022). *Luftschadstoffemissionen der Schweiz 1980 - 2020 nach dem territorial-Prinzip*. BAFU.
- European Environment Agency. (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. Von <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Frischknecht, R. A. (2021). *Electricity Mixes in Life Cycle Assessments*. BERN: BFE.
- Hank, C., Lazar, L., Mantei, F., Ouda, M., White, R., Smolinka, T., . . . Henning, H.-M. (2019). Comparative well-to-wheel life cycle assessment of OME3–5 synfuel production via the power-to-liquid pathway. *Sustainable Energy Fuels*, 3, S. 3219-3233.
- HBEFA. (2021). *Manuel informatisé des coefficients d'émission du trafic routier (MICET)*. Version 4.1. Von <https://www.hbefa.net/e/index.html>
- ICCT. (2022). *More bang for the buck: A comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany*.
- IPCC. (2013). *Fifth Assessment Report. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing (Simapro implementierten Version 1.02)*. IPCC.
- IPCC. (2022). *IPCC Sixth Assessment Report. Chapter 10: Transport*. IPCC.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. (Version 2.15 in Simapro). *Int J Life Cycle Assessment*, 324–330.
- OFEN. (2021). *Perspectives énergétiques 2050+*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html>
- OFEN. (2022). *Étiquette-énergie pour les voitures de tourisme : indicateurs environnementaux 2022 de la production d'électricité et de carburant*.

- OFEV. (2021). *Écofacteurs suisses 2021 selon la méthode de la saturation écologique. Bases méthodologiques et application à la Suisse. Connaissance de l'environnement no 2121.* Umwelt-Wissen Nr. 2121.
- OFEV. (2022). *Indicateurs de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse 1990-2020.* Office fédéral de l'environnement.
- OFROU. (2022). *Données relatives aux véhicules.* Von https://ivz-opensdata.ch/opensdata/1000-Fahrzeuge_IVZ/
- OFS. (2022A). *Prestations du transport de personnes.* Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/transport-personnes/prestations.html>
- OFS. (2022B). *Véhicules routiers – parc, taux de motorisation.* Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/infrastructures-transport-vehicules/vehicules/vehicules-routiers-parc-taux-motorisation.html>
- Plötz, P., Link, S., Ringelschwendner, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., . . . Mock, P. (2022). *REAL-WORLD USAGE OF LUG-IN HYBRID VEHICLES IN EUROPE.* Berlin: ICCT.
- PSI. (2020). *Incidences environnementales des voitures de tourisme.* Von <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjGkqSj8pT9AhWH57sIHc8wAqQQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fpubdb.bfe.admin.ch%2Ffr%2Fpublication%2Fdownload%2F9460&usg=AOvVaw0hWqw-otH-OxYddpZTRAUv>
- Sacchi, R. B. (2022). *Prospective life-cycle inventories for passenger cars in Switzerland.* Villigen, Switzerland: Paul Scherrer Institut.
- Sacchi, R., & Bauer, C. (2021). *Life cycle inventories for on-road vehicles.* Villigen, Switzerland: Paul Scherrer Institut.
- Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B., & Mutel, C. (2022). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162.
- treeze. (2018). *Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos.* Ausgearbeitet von: Rolf Frischknecht, Annika Messmer, Philippe Stolz. Uster: Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- van der Giesen, C., Kleijn, R., & Kramer, G. (2014). Energy and climate impacts of producing synthetic hydrocarbon fuels from CO₂. *Environmental science & technology*, 48(12), S. 7111-7121.
- Wietschel, M., Link, S., Biemann, K., & Helms, H. (2022). *Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien.* Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).
- Zhang, X. C. (2017). Life Cycle Assessment of Power-to-Gas: Approaches, System Variations and Their Environmental Implications. *Applied Energy*(190), S. 326-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ap>

Abréviations

AEE	Agence européenne pour l'environnement
BEV	Véhicule électrique à batterie (<i>Battery Electric Vehicles</i>)
CED	Demande d'énergie cumulée (<i>Cumulative Energy Demand</i>) : définition selon la directive VDI 4600 : « demande totale d'énergie primaire liée à la production, à l'utilisation et à l'élimination d'un bien économique (produit ou service) ou qui peut lui être originellement imputée » (définition selon la directive VDI 4600).
Co	Cobalt
CS	Carburants
éq.-CO ₂	Équivalent en dioxyde de carbone
FCEV	Véhicule électrique à pile à combustible (<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i>) dont l'énergie électrique est produite dans une pile à combustible à partir p. ex. de l'hydrogène utilisé comme agent énergétique, d'alcools (méthanol, éthanol) ou d'ammoniac, et directement convertie en mouvement par un système de propulsion électrique ou stockée temporairement dans une batterie de propulsion.
HEV	Véhicule électrique hybride (<i>Hybrid Electric Vehicles</i>) ; selon la directive 2007/46/CE, un « véhicule électrique hybride » est un véhicule hybride qui, aux fins de la propulsion mécanique, tire son énergie des deux sources suivantes d'énergie/d'alimentation stockée embarquées sur le véhicule : un combustible consommable et un dispositif de stockage d'énergie/d'alimentation électrique (selon la directive 2007/46/CE).
ICE	Véhicule muni d'un moteur à combustion interne (<i>Internal Combustion Engine</i>) ; véhicule avec un groupe motopropulseur comprenant exclusivement des moteurs à combustion comme convertisseur d'énergie.
LCI	Inventaire du cycle de vie (<i>Life Cycle Inventory</i>)
LFP	Lithium-fer-phosphate utilisé comme matériau de cathode dans les batteries de traction
Li	Lithium
MJ	Mégajoule = 1 000 000 joules
NCA	Lithium-nickel-cobalt-oxyde d'aluminium utilisé comme matériau de cathode dans les batteries de traction
Ni	Nickel
NMC	Lithium-nickel-manganèse-oxyde de cobalt utilisé comme matériau de cathode dans les batteries de traction
NOx, PM	Oxydes d'azote, poussières fines (<i>Particle Matter</i>)
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
PHEV	Véhicule avec une propulsion hybride (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> ou <i>Plug-in-Hybrid</i>) : véhicule avec une propulsion hybride. La dont la batterie est en général plus grande que dans celle des HEV et peut être rechargée soit via le moteur à combustion soit via une prise électrique.
TP	Transports publics
UCE	Unité de charge écologique : Unité de mesure de la méthode de la saturation écologique. La méthode repose sur des variables appelées écofacteurs, qui expriment l'impact environnemental lié à une émission polluante ou à l'utilisation de certaines ressources en unité de charge écologique (ou écopoint : UCE = UBP) par unité de quantité.
UF	<i>Utility Factor</i> , part de conduite en mode électrique
vkm	Véhicule-kilomètre (vkm) : unité de mesure de la prestation kilométrique ou de la prestation d'exploitation d'un véhicule. Un véhicule-kilomètre correspond au déplacement d'un véhicule sur un kilomètre.
VT	Voiture de tourisme
WLTP	Procédure d'essai harmonisée au niveau mondial pour les véhicules légers (<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure</i>)

7 Annexe

7.1 Hypothèses utilisées pour les catégories de véhicule

Tableau 11 : Principales hypothèses par catégorie de véhicule (Sacchi & Bauer, 2021)

Catégorie	Carburant	Propulsion (chimie de la batterie)	Poids à vide	Capacité de la batterie	Consommation (en litre d'essence/diesel ou en kg de gaz ; kWh par 100 km ; part de conduite en mode électrique [UF] en %)			Consommation (énergie en MJ)	Prestation kilométrique
					(l ou kg /100 km)	(kWh/100 km)	(%)		
			(kg)	(kWh)				(MJ/100 km)	(km)
Micro	Électricité	BEV (NCA)	528	17	-	10,7	100	38,6	60 000
Compacte	Essence	ICE	1180	-	5,3	-	-	168,5	200 000
	Essence	PHEV	1308	7	2,7	8,2	47	116,7	200 000
	Diesel	ICE	1216	-	4,0	-	-	142,5	200 000
	Diesel	PHEV	1293	7	2,3	8,2	47	112,0	200 000
	Électricité	BEV (NCA)	1284	40	-	16,1	100	58,0	200 000
Moyenne	Essence	ICE	1373	-	6,2	-	-	197,2	200 000
	Essence	HEV	1445	2	5,4	-	-	171,2	200 000
	Essence	PHEV	1438	10	3,2	8,7	47	132,0	200 000
	Diesel	ICE	1428	-	4,8	-	-	174,1	200 000
	Diesel	HEV	1425	2	3,9	-	-	142,8	200 000
	Diesel	PHEV	1432	10	2,7	8,7	47	131,7	200 000
	Gaz	ICE	1364	-	4,6	-	-	220,7	200 000
	H2	FCEV	1447	- ¹⁴	1,0	-	-	121,5	200 000
	Électricité	BEV (LFP)	1538	43	-	18,0	100	64,8	200 000
	Électricité	BEV (NCA)	1538	52	-	18,0	100	64,8	200 000
	Électricité	BEV (NMC)	1538	46	-	18,0	100	64,8	200 000
Supérieure	Essence	ICE	1788	-	8,4	-	-	264,9	200 000
	Essence	PHEV	2021	17	4,3	10,8	47	174,3	200 000
	Diesel	ICE	1815	-	6,5	-	-	236,4	200 000
	Diesel	PHEV	2008	17	3,9	10,8	47	182,5	200 000
	Électricité	BEV (NCA)	1909	83	-	20,7	100	74,5	200 000
Sup. SUV	Essence	ICE	2120	-	9,7	-	-	308,5	200 000
	Essence	PHEV	2355	16	4,9	12,5	47	201,6	200 000
	Diesel	ICE	2149	-	7,8	-	-	286,2	200 000
	Électricité	BEV (NCA)	2215	95	-	24,0	100	86,4	200 000

¹⁴ Les FCEV disposent d'une batterie comparable aux HEV, mais cela n'a pas été pris en compte dans la modélisation (cf. Sacchi (2021), p. 72)

7.2 Tableaux des données relatives aux figures

Tableau 13 relatif à la figure A1 et la figure 5 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global, les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée par vkm de VT de catégorie moyenne

			Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total	
Impact environnemental global selon la méthode de la saturation écologique (UCE/vkm)	Essence (2,6 % biogène)	Moteur à combustion	82	195	96	10	59	442	
		Hybride	97	172	83	11	60	423	
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	110	125	110	11	60	416	
	Diesel (5,9 % biogène)	Moteur à combustion	85	172	72	11	60	400	
		Hybride	96	144	59	11	60	370	
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	110	110	94	11	60	385	
	Gaz	(27,3 % biogène)	86	155	68	10	59	378	
	Pile à combustible	Mix consommateur ¹	115	17	316	11	61	520	
		Électricité renouvelable ²	114	16	51	11	60	252	
	Batterie	NCA	Mix consommateur ¹	151	17	109	12	62	351
			Électricité renouvelable ²	151	17	16	12	62	258
		NMC	Mix consommateur ¹	147	17	109	12	62	347
Électricité renouvelable ²			147	17	16	12	62	254	
LFP		Mix consommateur ¹	140	17	109	12	62	340	
		Électricité renouvelable ²	140	17	16	12	62	247	
¹ Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)									
² Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)									

				Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total	
Émissions de GES (g d'éq.-CO ₂ -/vkm)	Essence (2,6 % biogène)		Moteur à combustion	38,9	142,9	38,9	5,5	17,1	243,3	
			Hybride	44,3	124,2	33,9	5,8	17,5	225,7	
			Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	47,7	96,9	37,6	5,8	17,5	205,5	
	Diesel (5,9 % biogène)		Moteur à combustion	40,4	123,4	26,4	5,7	17,4	213,3	
			Hybride	43,4	101,3	21,7	5,7	17,4	189,5	
			Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	47,7	82,4	29	5,7	17,4	182,2	
	Gaz		(27,3 % biogène)	40,6	95,8	37,4	5,5	17,1	196,4	
	Pile à combustible		Mix consommateur ¹	48,8	0	78,1	5,8	17,5	150,2	
			Électricité renouvelable ²	48,8	0	9,7	5,8	17,5	81,8	
	Batterie	NCA		Mix consommateur ¹	59,6	0	27	6,2	18	110,8
				Électricité renouvelable ²	59,6	0	2,9	6,2	18	86,7
		NMC		Mix consommateur ¹	59,1	0	27	6,2	18	110,3
				Électricité renouvelable ²	59,1	0	2,9	6,2	18	86,2
		LFP		Mix consommateur ¹	58,2	0	27	6,2	18	109,4
				Électricité renouvelable ²	58,2	0	2,9	6,2	18	85,3
	¹ Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)									
	² Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)									

				Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total
Demande d'énergie cumulée (MJ/vkm)	Essence (2,6 % biogène)		Moteur à combustion	0,5	0	2,6	0,2	0,8	4,1
			Hybride	0,6	0	2,3	0,2	0,8	3,9
			Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	0,7	0	2,6	0,2	0,8	4,3
	Diesel (5,9 % biogène)		Moteur à combustion	0,6	0	2,2	0,2	0,8	3,8
			Hybride	0,6	0	1,8	0,2	0,8	3,4
			Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	0,7	0	2,3	0,2	0,8	4,0
	Gaz		(27,3 % biogène)	0,5	0	2,1	0,2	0,8	3,6
	Pile à combustible		Mix consommateur ¹	0,7	0	5,7	0,2	0,8	7,4
			Électricité renouvelable ²	0,7	0	2,6	0,2	0,8	4,3
	Électrique à batterie	NCA	Mix consommateur ¹	0,8	0	2,0	0,2	0,9	3,9
			Électricité renouvelable ²	0,8	0	0,9	0,2	0,9	2,8
		NMC	Mix consommateur ¹	0,8	0	2,0	0,2	0,9	3,9
			Électricité renouvelable ²	0,8	0	0,9	0,2	0,9	2,8
		LFP	Mix consommateur ¹	0,8	0	2,0	0,2	0,9	3,9
			Électricité renouvelable ²	0,8	0	0,9	0,2	0,9	2,8
¹ Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)									
² Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)									

Tableau 14 relatif à la figure 6 : Influence des différents systèmes de propulsion sur l'impact environnemental global (ventilé par catégories d'impact) par vkm d'une voiture de tourisme de catégorie moyenne (1250-1750 kg, exemples de véhicules voir tab. 2).

			GES	Déchet radioactif	Principaux polluants atmosphériques et PM	Métaux lourds (air)	Ressources d'énergie	Ressources minérales	Autre	Total
Essence (2,6 % biogène)		Moteur à combustion	243	20	31	16	34	10	88	442
		Hybride	226	20	30	16	32	14	85	423
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	205	41	31	19	34	15	71	416
Diesel (5,9 % biogène)		Moteur à combustion	214	20	28	15	30	10	83	400
		Hybride	190	20	27	15	27	13	78	370
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	182	41	29	18	31	15	69	385
Gaz (27,3 % biogène)			196	24	25	15	29	9	80	378
Pile à combustible		Mix consommateur ¹	150	160	31	21	54	20	84	520
		Électricité renouvelable ²	82	20	24	19	21	20	66	252
Électrique à batterie	NCA	Mix consommateur ¹	111	70	42	26	29	16	57	351
		Électricité renouvelable ²	87	21	40	25	17	16	52	258
	NMC	Mix consommateur ¹	110	70	33	31	29	17	57	347
		Électricité renouvelable ²	86	21	30	30	17	17	53	254
	LFP	Mix consommateur ¹	109	70	28	28	28	16	61	340
		Électricité renouvelable ²	85	21	25	27	17	16	56	247
¹ Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)										
² Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)										

Tableau 15 relatif à la figure 7 : Émissions de GES, impact environnemental global (UCE) et demande d'énergie cumulée en fonction de la prestation kilométrique (Cat. Moyenne)

UCE en fonction de la prestation kilométrique (UVE [millions de points])										
		0	25 000	50 000	75 000	100 000	125 000	150 000	175 000	200 000
Essence		16,3	25,6	34,9	44,2	53,4	62,7	72,0	81,2	90,5
BEV	Mix consommateur	30,3	35,5	40,7	45,9	51,1	56,3	61,5	66,7	71,9
	Électricité renouvelable	30,3	33,2	36,0	38,9	41,8	44,6	47,5	50,4	53,2
FCEV	Mix consommateur	22,8	33,1	43,5	53,8	64,1	74,4	84,7	95,0	105,3
	Électricité renouvelable	31,0	43,4	55,8	68,2	80,6	93,1	105,5	117,9	130,3
Émissions de GES en fonction de la prestation kilométrique (t d'éq.-CO ₂)										
		0	25 000	50 000	75 000	100 000	125 000	150 000	175 000	200 000
Essence		7,8	13,1	18,5	23,9	29,2	34,6	39,9	45,3	50,7
BEV	Mix consommateur	11,9	13,5	15,0	16,6	18,1	19,6	21,2	22,7	24,3
	Électricité renouvelable	11,9	12,8	13,7	14,6	15,5	16,4	17,3	18,2	19,0
FCEV	Mix consommateur	9,8	12,6	15,4	18,2	21,0	23,9	26,7	29,5	32,3
	Électricité renouvelable	13,2	16,6	20,0	23,4	26,8	30,2	33,6	37,0	40,4
Demande d'énergie cumulée en fonction de la prestation kilométrique (GJ)										
		0	25 000	50 000	75 000	100 000	125 000	150 000	175 000	200 000
Essence		109,1	200,2	291,3	382,4	473,6	564,7	655,8	747,0	838,1
BEV	Mix consommateur	172,0	242,8	313,5	384,3	455,0	525,8	596,5	667,3	738,0
	Électricité renouvelable	172,0	219,5	266,9	314,3	361,7	409,1	456,6	504,0	551,4
FCEV	Mix consommateur	146,9	297,8	448,8	599,7	750,6	901,5	1052,4	1203,4	1354,3
	Électricité renouvelable	146,9	231,6	316,3	401,0	485,7	570,4	655,1	739,8	824,5

Tableau 16 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur les émissions de GES (g d'éq.-CO₂-/vkm)

		Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total
Voiture à moteur à combustion (essence)	Catégorie supérieure SUV (2120 kg)	60,8	223,4	60,9	8,5	21,3	374,9
	Catégorie supérieure (1788 kg)	50,9	192,1	52,3	7,2	19,5	322,0
	Catégorie moyenne (1373 kg)	38,9	142,9	38,9	5,5	17,1	243,3
	Catégorie compacte (1180 kg)	33,4	121,2	33,2	4,7	16,0	208,5
Voiture à moteur à combustion (diesel)	Catégorie supérieure SUV (2149 kg)	61,7	202,9	43,4	8,6	21,5	338,1
	Catégorie supérieure (1815 kg)	51,7	166,8	35,7	7,3	19,6	281,1
	Catégorie moyenne (1428 kg)	40,4	123,4	26,4	5,7	17,4	213,3
	Catégorie compacte (1212 kg)	34,4	100,1	21,8	4,9	16,2	177,4
Hybride rechargeable (essence)	Catégorie supérieure SUV (2355 kg, 16 kWh)	76,6	150,8	57,2	9,5	22,7	316,8
	Catégorie supérieure (2021 kg, 17 kWh)	66,7	130,5	49,5	8,1	20,8	275,6
	Catégorie moyenne (1438 kg, 10 kWh)	47,7	96,9	37,6	5,8	17,5	205,5
	Catégorie compacte (1308 kg, 7 kWh)	43,2	84,0	33,4	5,2	16,7	182,5
BEV	Catégorie supérieure SUV (2215 kg, 95 kWh)	100,3	0,0	36,1	8,9	21,8	167,1
	Catégorie supérieure (1909 kg, 83 kWh)	85,2	0,0	31,1	7,7	20,3	144,3
	Catégorie moyenne (1538 kg, 52 kWh)	59,6	0,0	27,0	6,2	18,0	110,8
	Catégorie compacte (1284 kg, 40 kWh)	49,5	0,0	24,2	5,1	16,6	95,4
	Micro (528 kg, 17 kWh)	71,6	0,0	15,5	2,1	12,3	101,5

Tableau 17 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur l'impact environnemental global (UCE/vkm)

		Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total
Voiture à moteur à combustion (essence)	Catégorie supérieure SUV (2120 kg)	126,7	284,6	149,8	16,0	69,4	646,5
	Catégorie supérieure (1788 kg)	106,5	249,4	128,8	13,5	65,1	563,3
	Catégorie moyenne (1373 kg)	81,5	194,5	95,8	10,3	59,4	441,5
	Catégorie compacte (1180 kg)	70,2	154,9	81,6	8,9	56,7	372,3
Voiture à moteur à combustion (diesel)	Catégorie supérieure SUV (2149 kg)	128,9	265,9	118,7	16,3	69,9	599,7
	Catégorie supérieure (1815 kg)	108,6	223,4	97,6	13,7	65,3	508,6
	Catégorie moyenne (1428 kg)	85,0	172,5	72,2	10,8	59,9	400,4
	Catégorie compacte (1212 kg)	72,6	133,0	59,6	9,2	57,2	331,6
Hybride rechargeable (essence)	Catégorie supérieure SUV (2355 kg, 16 kWh)	172,3	182,9	166,1	17,8	72,6	611,7
	Catégorie supérieure (2021 kg, 17 kWh)	152,4	160,2	143,7	15,3	68,1	539,7
	Catégorie moyenne (1438 kg, 10 kWh)	110,0	125,3	110,1	10,8	60,2	416,4
	Catégorie compacte (1308 kg, 7 kWh)	99,2	113,2	98,9	9,9	58,4	379,6
BEV	Catégorie supérieure SUV (2215 kg, 95 kWh)	254,3	18,2	145,7	16,7	70,6	505,5
	Catégorie supérieure (1909 kg, 83 kWh)	218,3	17,5	125,6	14,4	66,8	442,6
	Catégorie moyenne (1538 kg, 52 kWh)	151,1	16,6	109,1	11,6	62,9	351,3
	Catégorie compacte (1284 kg, 40 kWh)	124,9	16,0	97,7	9,7	58,1	306,4
	Micro (528 kg, 17 kWh)	190,5	14,1	62,6	4,0	47,8	319,0

Tableau 18 relatif à la figure 8 : Influence de la taille et du poids des voitures de tourisme sur la demande d'énergie cumulée (MJ/vkm)

		Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien du véhicule	Route	Total
Voiture à moteur à combustion (essence)	Catégorie supérieure SUV (2120 kg)	0,8	0	4,1	0,2	0,9	6,0
	Catégorie supérieure (1788 kg)	0,7	0	3,6	0,2	0,9	5,4
	Catégorie moyenne (1373 kg)	0,5	0	2,6	0,2	0,8	4,1
	Catégorie compacte (1180 kg)	0,5	0	2,3	0,1	0,8	3,7
Voiture à moteur à combustion (diesel)	Catégorie supérieure SUV (2149 kg)	0,8	0	3,6	0,2	1,0	5,6
	Catégorie supérieure (1815 kg)	0,7	0	2,9	0,2	0,9	4,7
	Catégorie moyenne (1428 kg)	0,6	0	2,2	0,2	0,8	3,8
	Catégorie compacte (1212 kg)	0,5	0	1,8	0,1	0,8	3,2
Hybride rechargeable (essence)	Catégorie supérieure SUV (2355 kg, 16 kWh)	1,1	0	4,0	0,3	1,0	6,4
	Catégorie supérieure (2021 kg, 17 kWh)	0,9	0	3,4	0,2	0,9	5,4
	Catégorie moyenne (1438 kg, 10 kWh)	0,7	0	2,6	0,2	0,8	4,3
	Catégorie compacte (1308 kg, 7 kWh)	0,6	0	2,3	0,1	0,8	3,8
BEV	Catégorie supérieure SUV (2215 kg, 95 kWh)	1,4	0	2,7	0,3	1,0	5,4
	Catégorie supérieure (1909 kg, 83 kWh)	1,2	0	2,3	0,2	0,9	4,6
	Catégorie moyenne (1538 kg, 52 kWh)	0,8	0	2,0	0,2	0,9	3,9
	Catégorie compacte (1284 kg, 40 kWh)	0,7	0	1,8	0,1	0,8	3,4
	Micro (528 kg, 17 kWh)	1,0	0	1,1	0,1	0,7	2,9

Tableau 19 relatif à la figure 9 : Potentiel d'effet de serre par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen. Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne

GES en kg d'éq-CO ₂ /personne et distance								
			Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien véhicule	Route	Somme
Courte distance (5 km)	TP	Moyenne TP	0,006	0,018	0,007	0,001	0,029	0,062
		Vélo	0,021	0,000	0,000	0,006	0,003	0,030
		Vélo électrique (<45 km/h)	0,035	0,000	0,009	0,005	0,003	0,052
	Scooter	Électrique	0,229	0,000	0,037	0,048	0,049	0,363
		Essence	0,087	0,404	0,102	0,049	0,049	0,691
	VT	Micro électrique, NCA	0,224	0,000	0,048	0,007	0,038	0,317
		Cat, moyenne élec, NCA	0,186	0,000	0,084	0,019	0,056	0,345
		Cat, moyenne essence	0,122	0,447	0,122	0,017	0,053	0,761
	Distance moyenne (30 km)	TP	RER CH	0,045	0,003	0,034	0,037	0,126
Moyenne TP			0,036	0,109	0,043	0,007	0,177	0,372
Vélo électrique (<45 km/h)			0,212	0,000	0,053	0,031	0,018	0,314
Scooter		Électrique	1,375	0,000	0,222	0,290	0,291	2,178
		Essence	0,519	2,425	0,610	0,293	0,291	4,138
VT		Micro électrique, NCA	1,342	0,000	0,291	0,040	0,231	1,904
		Cat, moyenne élec, NCA	1,117	0,000	0,506	0,116	0,338	2,077
		Cat, moyenne essence	0,729	2,680	0,730	0,103	0,321	4,563
Longue distance (100 km)		TP	Ferroviaire longue distance	0,087	0,003	0,065	0,072	0,454
	VT	Cat, moyenne élec, NCA	3,725	0,000	1,687	0,385	1,128	6,925
		Cat, moyenne essence	2,430	8,933	2,434	0,344	1,070	15,211

Tableau 20 relatif à la figure 10 : UCE par personne pour une distance de 5, 30 et 100 km avec un taux d'occupation moyen. Taux d'occupation appliqués : trafic ferroviaire longue distance = 33 %, réseau express régional (RER) = 26 %, voiture de tourisme = 1,6 personne, deux-roues = 1 personne

Impact environnemental en UCE/personne et distance								
			Véhicule	Émissions directes	Fourniture agent énergétique	Entretien véhicule	Route	Somme
Courte distance (5 km)	TP	Moyenne TP	14,4	36,4	25,2	2,4	80,8	159,1
		Vélo	43,9	9,3	0,0	10,2	6,0	69,4
		Vélo électrique (<45 km/h)	86,7	10,7	35,7	9,5	7,1	149,7
	Scooter	Électrique	563,0	70,0	149,6	77,2	207,8	1067,6
		Essence	181,4	720,9	250,3	78,8	207,8	1439,2
	VT	Micro électrique, NCA	595,2	44,0	195,6	12,4	149,4	996,6
		Cat. moyenne élec. NCA	472,2	52,0	340,8	36,2	192,3	1093,5
		Cat. moyenne essence	254,8	607,9	299,4	32,3	185,3	1379,7
	Distance moyenne (30 km)	TP	RER CH	103,1	241,4	294,0	70,2	369,0
Moyenne TP			86,1	218,3	150,9	14,5	484,8	954,7
Vélo électrique (<45 km/h)			520,3	64,0	214,0	57,0	42,5	897,8
Scooter		Électrique	3377,7	420,1	897,8	463,4	1246,6	6405,6
		Essence	1088,3	4325,3	1501,9	472,6	1246,6	8634,7
VT		Micro électrique, NCA	3571,0	263,9	1173,7	74,7	896,4	5979,7
		Cat. moyenne élec. NCA	2833,5	312,1	2044,8	217,4	1153,6	6561,4
	Cat. moyenne essence	1529,0	3647,4	1796,3	194,0	1111,7	8278,4	
Longue distance (100 km)	TP	Ferroviaire longue distance	199,9	814,0	559,4	136,3	1333,8	3043,4
	VT	Cat. moyenne élec. NCA	9445,0	1040,4	6815,9	724,7	3845,4	21871,4
		Cat. moyenne essence	5096,6	12158,0	5987,5	646,7	3705,7	27594,5

Tableau 21 : Prestation kilométrique pour laquelle le véhicule considéré a le même impact environnemental que la VT de catégorie moyenne à essence. Au-delà de cette prestation, l'impact environnemental de la VT de catégorie moyenne à essence est supérieur à celui du véhicule considéré (figure 7).

	UCE	GES	CED
VT catégorie moyenne essence			
VT catégorie compacte batterie mix consommateur	48201	13492	31956
VT catégorie moyenne batterie mix consommateur	85693	27137	77268
VT catégorie supérieure batterie mix consommateur	200067	63997	314118
Catégorie supérieure SUV batterie mix consommateur	314866	89702	4394861
Catégorie micro batterie électricité renouvelable	0	0	0
VT catégorie compacte batterie électricité renouvelable	32915	11750	17924
VT catégorie moyenne batterie électricité renouvelable	54441	23169	36027
VT catégorie supérieure batterie électricité renouvelable	112075	52977	91805
Catégorie supérieure SUV électricité renouvelable	147471	71460	141893
VT cat. compacte pile à combustible mix consommateur	Jamais	17637	Jamais
VT cat. moyenne pile à combustible mix consommateur	Jamais	19564	Jamais
VT cat. supérieure pile à combustible mix consommateur	Jamais	69461	Jamais
Cat. supérieure SUV pile à combustible mix consommateur	Jamais	130120	Jamais
VT cat. compacte pile à combustible électricité renouvelable	27620	11120	65192
VT cat. moyenne pile à combustible électricité renouvelable	29028	11306	147225
VT cat. supérieure pile à combustible électricité renouvelable	73332	32118	Jamais
Cat. supérieure SUV pile à combustible électricité renouvelable	106761	46039	Jamais

Tableau 22 relatif à la figure 11 et à la figure 12)

(par vkm)	Hybride		Hybride rechargeable		Pile à combustible		Électrique à batterie	
	g éq.-CO ₂	UCE						
2021	225,7	423	205,5	416	150,2	520	110,8	351
2030 PPA	290,2	641	169,5	436	133,0	376	102,2	293
2030 ZÉRO base	241,7	569	142,3	394	118,8	352	88,9	263
2040 PPA	262,7	511	161,8	360	127,1	310	100,1	267
2030 ZÉRO base	188,6	416	120,6	308	114,9	292	80,9	224
2050 PPA	219,7	438	143,5	330	119,4	295	95,7	255
2030 ZÉRO base	164,9	376	111,5	295	113,6	283	78,0	217

Tableau 23 relatif à la figure 13 et à la figure 14

	g d'éq.-CO ₂ /vkm	UCE/vkm
Essence 2021	243,3	442
Essence 2050 PPA	273,9	509
Essence 2050 ZÉRO base	196,4	421
Essence 2050 100 % éolien	130,3	329
Diesel 2021	213,3	400
Diesel 2050 PPA	222,2	413
Diesel 2050 ZÉRO base	144,9	325
Diesel 2050 100 % éolien	79,1	234
Pile à combustible 2021	150,2	520
Pile à combustible 2050 PPA	100,2	251
Pile à combustible 2050 ZÉRO base	94,4	238
Pile à combustible 2050 100 % éolien	71,0	198
Électrique à batterie 2021	110,8	351
Électrique à batterie 2050 PPA	77,8	211
Électrique à batterie 2050 ZÉRO base	63,2	181
Électrique à batterie 2050 100 % éolien	55,0	157

Tableau 24 relatif à la figure 15 : Influence de l'origine de l'électricité utilisée sur l'impact environnemental global (ventilé selon la catégorie d'impact), les émissions de GES et la demande d'énergie cumulée (ventilée selon la source d'énergie)

		Véhicule de catégorie moyenne										
		Véhicule de référence		Électricité								
				Centrale à gaz			Photovoltaïque			Éolien		
		Essence	BEV (mix consommateur)	Pile à combustible	Hybride rechargeable essence	Électrique à batterie	Pile à combustible	Hybride rechargeable essence	Électrique à batterie	Pile à combustible	Hybride rechargeable essence	Électrique à batterie
UCE (Points/vkm)	GES	243,4	110,9	461,8	269,5	240,6	140,5	220,1	120,9	105	214,7	107,7
	Déchet radioactif	19,9	70,2	29,6	21,8	22,5	31,6	22,1	23,2	28,9	21,7	22,2
	Principaux polluants atmosphériques & PM	31	42,3	41,8	35	52,4	37,1	34,2	50,6	29	33	47,6
	Métaux lourds (air)	15,9	26,1	18,3	21	28,7	22,3	21,7	30,2	20,1	21,3	29,3
	Ressources d'énergie	33,7	28,6	68,5	37,2	35,2	27,5	30,9	19,9	24	30,3	18,6
	Ressources minérales	9,9	16,4	22,1	17,7	18,9	25,8	18,2	20,2	22,2	17,7	18,9
	Autres	88,2	56,8	59,5	73,7	52	65,5	74,6	54,2	56,4	73,2	50,8
GES	kg d'éq.-CO ₂ /vkm	243,4	110,9	461,8	269,5	240,6	140,5	220,1	120,9	105,0	214,7	107,7
CED (MJ/vkm)	Non renouvelable, fossile	3,5	1,4	7,4	3,8	3,6	1,7	3	1,5	2,9	1,4	1,3
	Non renouvelable, nucléaire	0,5	1,8	0,8	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,8	0,6
	Renouvelable	0,2	0,6	0,3	0,3	0,2	2,5	0,6	1,1	2,5	0,6	1,1

Tableau 25 relatif à la figure 16 : Influence du facteur d'utilité (UF, pourcentage d'utilisation en mode tout électrique sur la prestation kilométrique totale) pour les véhicules hybrides rechargeables (PHEV)

Mix CH = mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)

		Catégorie moyenne		Hybride rechargeable							
		Moteur à combustion essence	Électrique à batterie (mix CH)	Catégorie supérieure SUV		Catégorie supérieure		Catégorie moyenne		Catégorie compacte	
				Base	Jamais rechargé	Base	Jamais rechargé	Base	Jamais rechargé	Base	Jamais rechargé
UCE (Points/vkm)	GES	243,4	110,9	316,8	382,2	275,7	331,9	205,5	247,7	182,8	217,8
	Déchet radioactif	19,9	70,2	53,5	24,7	48,3	23,4	41,0	21,1	39,3	20,4
	Principaux polluants atmosphériques & PM	31,0	42,3	47,3	52,2	41,7	46,0	30,7	34,1	27,5	30,0
	Métaux lourds (air)	15,9	26,1	29,6	30,1	26,4	27,0	19,0	19,5	16,8	16,9
	Ressources d'énergie	33,7	28,6	50,0	51,3	43,9	45,0	33,8	34,5	30,7	30,7
	Ressources minérales	9,9	16,4	21,9	21,9	19,6	19,5	15,2	15,4	14,3	14,2
	Autres	88,2	56,8	94,4	111,6	85,5	101,9	72,3	84,9	69,4	79,2
GES	kg d'éq.-CO ₂ /vkm	243,4	110,9	316,8	382,2	275,7	331,9	205,5	247,7	182,8	217,8
CED (MJ/vkm)	Non renouvelable, fossile	3,5	1,4	4,5	5,4	3,9	4,7	2,9	3,5	2,6	3,1
	Non renouvelable, nucléaire	0,5	1,8	1,4	0,6	1,3	0,6	1,1	0,5	1,0	0,5
	Renouvelable	0,2	0,6	0,6	0,3	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2

Tableau 26 relatif à la figure 17 : Influence de la méthode d'évaluation de l'impact utilisée (véhicule de catégorie moyenne)
 Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %). Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables).

			GES	Principaux polluants atmosphériques et PM	Métaux lourds (air)	Ress. d'énergie	Ress. minérales	Déchet radioactif	Autres	Total
UCE	Essence (2,4 % bio.)	Moteur à combustion	243	31	16	34	10	20	88	442
		Hybride	226	30	16	32	14	20	85	423
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	205	31	19	34	15	41	71	416
	Diesel (5,6 % bio.)	Moteur à combustion	214	28	15	30	10	20	83	400
		Hybride	190	27	15	27	13	20	78	370
		Hybride rechargeable (mix consommateur ¹)	182	29	18	31	15	41	69	385
	Gaz (27,3 % bio.)		196	25	15	29	9	24	80	378
	Pile à combustible	Mix consommateur ¹	150	31	21	54	20	160	84	520
		Électricité renouvelable ²	82	24	19	21	20	20	66	252
	Électrique à batterie	Mix consommateur ¹	111	42	26	29	16	70	57	351
Électricité renouvelable ²		87	40	25	17	16	21	52	258	
			GES	Santé humaine	Qualité d'écosystème	Ressources				
Impact	Essence (2,4 % bio.)	Moteur à combustion	23,9	17,7	3,8	26,3				71,7
		Hybride	22,1	17,3	3,6	24,7				67,7
		Hybride rechargeable ¹	20,1	17,5	4,1	26,1				67,8
	Diesel (5,6 % bio.)	Moteur à combustion	20,8	13,5	3,7	23,4				61,4
		Hybride	18,5	12,9	3,4	21,2				56
		Hybride rechargeable ¹	17,8	14,3	4	23,9				60
	Gaz (27,3 % bio.)		17,8	11,5	3,2	22,8				55,3
	Pile à combustible	Mix consommateur ¹	14,4	16,3	4,6	40,1				75,4
		Électricité renouvelable ²	7,9	12,1	3,8	11				34,8
	Électrique à batterie	Mix consommateur ¹	10,6	20,5	4,9	21,7				57,7
Électricité renouvelable ²		8,3	19	4,6	11,4				43,3	
¹ Mix consommateur 2018 (35 % hydraulique, 40 % nucléaire, 10,7 % nouvelles énergies renouvelables, 14,3 % autres. Total des importations 45 %)										
² Électricité renouvelable (96 % hydraulique, 4 % autres renouvelables)										

Tableau 27 relatif à la figure 18 et à la figure 19

	g d'éq.- CO ₂ /vkm	UCE/vkm
BEV 2021	110,546	350
BEV 2021, mix électrique 2030	102,150	293
BEV 2030, mix électrique 2030	91,182	266
+ recyclage	88,960	263
+ prestation kilométrique (+ 50 %)	71,993	220
+ seconde vie (+ 50 %)	68,054	206
BEV 2030, mix électrique 2040	89,400	252
BEV 2040, mix électrique 2040	82,996	229
+ recyclage	80,854	224
+ prestation kilométrique (+ 50 %)	65,432	187
+ seconde vie (+50 %)	62,887	177
BEV 2040, mix électrique 2050	82,000	225
BEV 2050, mix électrique 2050	79,753	220
+ recyclage	78,008	217
+ prestation kilométrique (+ 50 %)	63,158	181
+ seconde vie (+ 50 %)	60,868	173
+ 100 % courant éolien	55,005	157

Tableau 28 relatif à la figure 20

	2021	2050 PPA	+ mix élec. ZÉRO base	+ recyclage ZÉRO base	+ 100 % recyclage
Consommation d'eau	0,48132223	0,48132223	0,466250234	0,45937055	0,44677159
Prélèvement d'eau	0	0	0	0	0
Ressources en énergie	1,47175547	1,47175547	1,191331549	1,08165762	0,86533694
Ressources en matières premières minérales	1,57842993	1,57842993	1,585590326	1,49481077	1,30640617
Utilisation des sols	0,1637824	0,1637824	0,156735217	0,1332679	0,10308945
Changements climatiques	10,7440933	10,7440933	8,052123884	7,19581489	5,41645702
Substance appauvrissant la couche d'ozone	0,01301525	0,01301525	0,012133629	0,01088108	0,00799882
Principaux polluants et particules	9,15621682	9,15621682	8,562442792	7,24274772	4,01488561
Substances cancérigènes présentes dans l'air	1,10059214	1,10059214	1,067813579	1,05457352	1,02684501
Métaux lourds présents dans l'air	13,6751272	13,6751272	13,54583775	13,3836362	12,8787739
Polluants de l'eau	1,56326564	1,56326564	1,552848824	1,45747534	1,3796522
POP présents dans l'eau	0,09432674	0,09432674	0,081561525	0,06894636	0,04174757
Métaux lourds présents dans l'eau	0,15652781	0,15652781	0,118522256	0,11190828	0,0989472
Pesticides présents dans le sol	0,01206836	0,01206836	0,003339016	0,00262599	0,00143333
Métaux lourds présents dans le sol	0,27303593	0,27303593	0,143976449	0,12377653	0,09710206
Substances radioactives présentes dans l'air	2,7226E-05	2,7226E-05	1,89882E-05	1,6031E-05	1,1E-05
Substances radioactives présentes dans l'eau	0,05415499	0,05415499	0,042218769	0,0355137	0,02416946
Bruit	0,09859887	0,09859887	0,093936338	0,07474144	0,03808671
Déchets, non radioactifs	0,36205239	0,36205239	0,37370633	0,36019533	0,32483822
Déchets radioactifs stockés définitivement	1,03233798	1,03233798	0,728824202	0,61511048	0,42250962
Ressources biotiques	0	0	0	0	0

7.3 Futurs mix électriques

Tableau 29 : Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Dataset in DETEC 2018
Hydropower	145	141	140	
Run-of-river	64	62	58	electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/CH U
Reservoir	81	80	82	electricity, hydropower, net, at reservoir power plant/kWh/CH U
Nuclear	32	0	0	electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/kWh/CH U electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/kWh/CH U
Conventional thermal power	9	11	13	
Waste-to-energy plant	7	7	7	Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U
Other	2	4	5	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Renewables	28	33	44	
Photovoltaics	24	30	40	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U
Wind turbines	1	1	1	Electricity, at wind power plant/CH U
Geothermal	0	0	1	
Biomass	1	1	1	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Biogas	1	1	1	electricity, at cogen with biogas engine, methane 96 %-vol allocation exergy/CH U
Sum	215	186	197	
Import	20	20	21	electricity, european attribute mix, XXX, BAU, at plant/kWh/RER

Tableau 30 : Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Dataset in DETEC 2018
Hydropower	150	158	161	
Run-of-river	66	67	67	electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/CH U
Reservoir	84	91	94	electricity, hydropower, net, at reservoir power plant/kWh/CH U
Nuclear	32	0	0	electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/kWh/CH U electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/kWh/CH U
Conventional thermal power	8	9	10	
Waste-to-energy plant	7	7	6	Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U
Other	3	4	3	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Renewables	36	89	146	
Photovoltaics	31	77	121	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U
Wind turbines	2	8	16	Electricity, at wind power plant/CH U
Geothermal	0	2	7	
Biomass	1	1	1	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Biogas	1	1	1	electricity, at cogen with biogas engine, methane 96 %-vol allocation exergy/CH U
Sum	227	257	316	
Import	10	5	0	electricity, european attribute mix, XXX, ZERO Basis, at plant/kWh/RER

Tableau 31 : Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Datasets in DETEC 2018
Nuclear	1158	294	33	Electricity, nuclear, at power plant/UCTE U
Coal	372	0	0	Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U
Natural gas	1010	1676	1243	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Other	219	207	240	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Biomass	243	203	160	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Onshore wind	896	1074	1458	Electricity, at wind power plant 800kW/RER U
Offshore wind	298	396	693	Electricity, at wind power plant 2MW, offshore/OCE U
Photovoltaics	592	937	1290	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/DE U
Hydro	674	691	731	electricity, hydropower, at reservoir power plant, alpine region/kWh/RER U electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/kWh/RER U electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER U

Tableau 32 : Electricity production mix for neighboring countries, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Datasets in DETEC 2018
Nuclear	291	57	5	Electricity, nuclear, at power plant/UCTE U
Coal	69	0	0	Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U
Natural gas	198	225	155	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Other	56	64	69	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Biomass	66	47	31	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Onshore wind	299	466	590	Electricity, at wind power plant 800kW/RER U
Offshore wind	166	343	499	Electricity, at wind power plant 2MW, offshore/OCE U
Photovoltaics	273	528	817	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/DE U
Hydro	189	192	198	electricity, hydropower, at reservoir power plant, alpine region/kWh/RER U electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/kWh/RER U electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER U

7.4 Allocation de l'impact environnemental lors de la fabrication de carburants synthétiques

Tableau 33 : Allocation of Fischer-Tropsch syncrude production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic diesel product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)

Energy-based allocation	LHV (MJ/kg)	Energy produced (GJ)	Energy produced (%)	Mass (kg)	Mass syn-gas, allocated (kg)	Mass syn-gas, allocated (kg/kg)	Embedded CO ₂ from syngas (kg/kg)	CO ₂ content (kg/kg)	Carbon correction (kg/kg)
Syngas	23,94	980 752	100	40'967'084			1,37		
Naphtha	44,5	190 189	24 %	4 273 910	9 930 511	2,32	3,19	3,37	0,18
Kerosene	45	143 100	18 %	3 180 000	7 471 810	2,35	3,23	3,14	- 0,09
Diesel	43,3	286 404	37 %	6 614 411	14 954 272	2,26	3,11	3,16	0,05
Lubricating oil	40,2	164 908	21 %	4 102 189	8 610 491	2,10	2,88	2,75	- 0,13
Loss		196 151							

Tableau 34 : Allocation of synthetic methanol production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic gasoline product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)

Energy-based allocation	LHV (MJ/kg)	Mass (kg)	Energy produced (MJ)	Energy produced (%)	Mass methanol, allocated (kg/kg fuel)	CO ₂ captured from methanol (kg/kg)	CO ₂ content of fuel (kg CO ₂ /kg)	Carbon correction (kg/kg)
Methanol	19	2,42				1,37		
Diesel	44	0,183	8,05	19 %	2,449	- 3,36	3,16	- 0,20
LPG	45,5	0,086	3,91	9 %	2,533	- 3,47	3,01	- 0,46
Gasoline	43,4	0,466	20,22	47 %	2,416	- 3,31	3,14	- 0,17
Kerosene	42,6	0,265	11,29	26 %	2,371	- 3,25	3,14	- 0,11