

MARIE CHÉRON • FONDATION POUR LA NATURE ET L'HOMME  
ABRIAL GILBERT-D'HALLUIN • EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION  
AURÉLIEN SCHULLER • CARBONE 4

# QUELLE CONTRIBUTION DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE À LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE EN FRANCE ?

Enjeux environnementaux et perspectives d'intégration  
des écosystèmes Mobilité et Energie

DÉCEMBRE 2017



FONDATION  
POUR LA NATURE  
ET L'HOMME

# SOMMAIRE

<i>Glossaire</i> .....	6
<b>MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>7</b>
1. Contexte et objectifs de l'étude .....	8
1.1. Contexte .....	8
1.2. Objectifs .....	9
1.3. Démarche .....	9
1.4. Applications envisagées et public concerné .....	10
2. Champ de l'étude .....	11
2.1. Unité fonctionnelle .....	11
2.2. Véhicules considérés .....	11
2.3. Considération de la fonction secondaire des batteries pour stocker de l'énergie .....	13
3. Les scénarios .....	14
3.1. Principe de construction des scénarios contrastés .....	15
3.2. Scénario de référence « Loi de transition énergétique » .....	17
3.3. Le scénario 1 « Ambition transition énergétique » .....	17
3.4. Le scénario 2 « Accélération en faveur des énergies renouvelables » .....	17
3.5. Le scénario 3 « Renoncement politique » .....	18
4. Frontière du système .....	19
4.1. Analyse de cycle de vie 2016 .....	20
4.2. Etape de la projection à 2030 et extension du cycle de vie .....	22
5. Inventaire du cycle de vie 2016 .....	24
5.1. Collecte de données : méthodes et procédures .....	24
5.2. Composition des véhicules .....	24
5.3. Usines et logistique .....	25
5.4. Usage .....	26
5.5. Fin de vie .....	27
5.6. Catégories d'impact considérés .....	27
6. Modélisation prospective 2030 .....	31
6.1. Description de la modélisation .....	31
6.2. Impacts de la fabrication du véhicule en dehors de sa batterie .....	31
6.3. Batteries .....	32
6.4. Impacts de l'usage du véhicule .....	33
6.5. Caractéristiques des charges .....	35
6.6. Hypothèses et modélisation de la consommation d'électricité .....	41
6.7. Seconde vie de la batterie .....	47
6.8. Fin de vie et recyclage .....	49
6.9. Hypothèses sur le parc de véhicules à 2030 .....	51
6.10. Analyses de sensibilités pour la projection 2030 .....	51
6.11. Limites à la modélisation prospective .....	52

RÉSULTATS .....	53
1. Évolution des 5 indicateurs d'impacts entre 2016 et 2030 dans le cadre de la transition énergétique .....	54
1.1. Déplétion abiotique / épuisement des ressources fossiles .....	55
1.3. Potentiel d'acidification des écosystèmes .....	59
1.4. Potentiel d'eutrophisation .....	61
1.5. Potentiel de création d'ozone photochimique .....	62
2. Évaluation du potentiel de services au système électrique offert par les batteries en première et seconde vie en 2030 .....	65
2.1. Méthode .....	65
2.2. Résultats par véhicule .....	65
2.3. Potentiel de services rendus au système électrique pour 4,4 millions de véhicules électriques .	71
3. Scénarios 2030 .....	74
3.1. Mesure des impacts des trois scénarios .....	75
3.2. Potentiel de services rendus au système électrique dans les trois scénarios .....	77
3.3. Evaluation de la capacité de stockage d'un stock de batteries en seconde vie .....	79
4. Analyses de sensibilité pour la prospective 2030 .....	80
4.1. Sensibilité à l'évolution du mix énergétique en 2030 .....	80
4.2. Sensibilité à l'évolution des packs batteries .....	82
4.3. Sensibilité à l'évolution du taux de recyclage des matériaux (batteries) .....	82
4.4. Sensibilité à la modification du nombre de batteries sur 10 ans .....	83
4.5. Sensibilité de l'impact climatique à la modification du kilométrage .....	83
4.6. Sensibilité au taux de pertes pour la recharge rapide .....	84
4.7. Sensibilité à l'évolution de la composition du parc électrique (variation en fonction du taux de VHR dans le parc électrique) .....	84
 ANNEXES .....	 85
Annexe 1 : Qualité des données .....	86
Annexe 2 : Composition matière des véhicules considérés .....	87
Annexe 3 : Opérations de maintenance .....	89
Annexe 4 : Indicateurs d'impacts 2016-2030 des 8 véhicules .....	90
Annexe 5 : Services au système électrique par scénario et par type de véhicule .....	95
Annexe 6 : Sensibilité des paramètres aux hypothèses de déploiement différenciées du véhicule électrique .....	96
Annexe 7 : Rapport de revue critique .....	100
 BIBLIOGRAPHIE .....	 110
 LA FONDATION POUR LA NATURE ET L'HOMME .....	 112

## Liste des figures «Méthodologie»

<b>Figure 1</b> : Immatriculations de véhicules électriques 2010-2017 en France .....	8
<b>Figure 2</b> : vue d'ensemble des scénarios 2030 .....	14
<b>Figure 3</b> : Analyse de cycle de vie : Frontière du système 2016-2030.....	19
<b>Figure 4</b> : Périmètre de l'analyse de cycle de vie (ACV) .....	20
<b>Figure 5</b> : Décomposition phase d'usage des véhicules .....	21
<b>Figure 6</b> : Les différentes étapes de la prospective .....	23
<b>Figure 7</b> : Méthode d'acquisition de données .....	25
<b>Figure 8</b> : Modélisation du recyclage .....	27
<b>Figure 9</b> : Probabilité d'être en stationnement pour un véhicule selon les types de journées.....	37
<b>Figure 10</b> : Probabilité d'être en stationnement en dehors des départs et retours de vacances .....	37
<b>Figure 11</b> : Profils de charge pour un véhicule moyen.....	38
<b>Figure 12</b> : Mix électrique 2015 .....	42
<b>Figure 13</b> : Mix Ambition Transition énergétique 2030 .....	42
<b>Figure 14</b> : Mix vers 100% ENR (43% ENR) .....	42
<b>Figure 15</b> : Mix carboné (19%-17% ENR Fossile) .....	42
<b>Figure 16</b> : Profils horaires de production électrique par filière.....	43
<b>Figure 17</b> : Facteurs d'émissions par filières de production électrique .....	44
<b>Figure 18</b> : Echanges d'électricité avec véhicule V2G.....	46
<b>Figure 1</b> : Composition du parc 2030.....	55
<b>Figure 2</b> : Consommation de ressources fossiles : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines.....	55
<b>Figure 3</b> : Consommation de ressources fossiles : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines.....	56
<b>Figure 4</b> : Contribution à l'épuisement des ressources fossiles d'un parc de 4,4 millions - Estimation à 2030 .....	56
<b>Figure 5</b> : Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines.....	57
<b>Figure 6</b> : Contribution au changement climatique : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines.....	58
<b>Figure 7</b> : Contribution au changement climatique d'un parc de 4,4 millions - estimation 2030 .....	58
<b>Figure 8</b> : Potentiel d'acidification : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines.....	59
<b>Figure 9</b> : Potentiel d'acidification : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines.....	60
<b>Figure 10</b> : Potentiel d'acidification d'un parc .....	60
<b>Figure 11</b> : Potentiel d'eutrophisation : résultats 2016-2030 comparés pour le segment des citadines .....	61
<b>Figure 12</b> : Potentiel d'eutrophisation : résultats 2016-2030 comparés pour le segment des berlines.....	62
<b>Figure 13</b> : Impact de potentiel d'eutrophisation d'un parc de 4,4 millions - estimation 2030.....	62
<b>Figure 14</b> : potentiel de création d'ozone photochimique : résultats 2016-2030 - citadines .....	63
<b>Figure 15</b> : Impact de potentiel de création d'ozone photochimique d'un parc de 4,4 millions - estimation 2030 .....	63
<b>Figure 16</b> : Impact de potentiel de création d'ozone photochimique d'un parc de 4,4 millions - estimation 2030 .....	64

<b>Figure 17</b> : Gisement des gains pour 5 véhicules électriques en première vie .....	66
<b>Figure 18</b> : Impact de la charge optimum carbone sur les indicateurs hors pouvoir de réchauffement global .....	67
<b>Figure 19</b> : Contribution au réchauffement global 2016-2030 intégrant les services aux systèmes électriques .....	68
<b>Figure 20</b> : Contribution au changement climatique 2016-2030 intégrant les services aux systèmes électrique .....	69
<b>Figure 21</b> : Contribution au réchauffement global 2016-2030 intégrant les services au système électrique.....	70
<b>Figure 22</b> : Services au système électrique/ Potentiel du scénario 1, Ambition transition énergétique.....	71
<b>Figure 23</b> : Cas d'usage du V2G (journée d'hiver).....	72
<b>Figure 24</b> : Gisements d'énergie disponible et capacité de stockage d'une citadine VE en 2030.....	72
<b>Figure 25</b> : Estimation des gisements maximums avec 100% des charges qui sont éligibles au V2G.....	73
<b>Figure 26</b> : Impacts environnementaux comparés des scénarios .....	75
<b>Figure 27</b> : Potentiel d'acidification des scénarios selon les phases du cycle en première vie.....	76
<b>Figure 28</b> : Contribution au réchauffement global des scénarios par phase du cycle en première vie.....	77
<b>Figure 29</b> : Potentiel de service rendus au système électrique par les différents scénarios.....	78
<b>Figure 30</b> : Capacité de stockage en seconde vie comparée entre les scénarios .....	79
<b>Figure 31</b> : trois hypothèses de mix électriques en 2030.....	80
<b>Figure 32</b> : Sensibilité de l'indicateur climatique au facteur d'émission de l'électricité .....	81
<b>Figure 33</b> : Sensibilité au kilométrage parcouru en 10 ans pour les citadines et berlines électriques .....	83

## Liste des figures «Résultats»

<b>Figure 1</b> : Composition matière des citadines .....	87
<b>Figure 2</b> : Composition matière des berlines.....	88
<b>Figure 3</b> : Services au système électrique, scénario 1.....	95
<b>Figure 4</b> : Services au système électrique, scénario 2 .....	95
<b>Figure 5</b> : Services au système électrique, scénario 3 .....	95

## Liste des tableaux «Méthodologie»

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques des véhicules de la gamme citadine en 2016.....	12
<b>Tableau 2</b> : Caractéristiques des véhicules de la gamme berline en 2016.....	12
<b>Tableau 3</b> : Profils de roulage.....	12
<b>Tableau 4</b> : Logique de construction des scénarios.....	16
<b>Tableau 5</b> : Tableau des hypothèses retenues dans les 3 scénarios.....	18
<b>Tableau 6</b> : Lieux de production et sources des informations utilisées dans l'ACV.....	21
<b>Tableau 7</b> : Répartition des modes de roulage électrique - thermique pour les hybrides en 2016.....	26
<b>Tableau 8</b> : Matrice de sélection indicateurs d'impacts ...	28
<b>Tableau 9</b> : Valeurs de normalisation pour les 5 indicateurs de l'étude ACV.....	29
<b>Tableau 10</b> : Hypothèses 2030 sur les gains d'impact environnemental de la production des véhicules entre 2016 et 2030.....	31
<b>Tableau 11</b> : Hypothèses sur l'évolution des batteries en 2030*.....	32
<b>Tableau 12</b> : Valeurs d'impacts environnementaux des batteries 2030.....	33
<b>Tableau 13</b> : Répartition des modes de roulage électrique - thermique pour les véhicules en 2030.....	34
<b>Tableau 14</b> : Synthèse des consommations des véhicules (Valeurs en conditions réelles d'utilisation).....	35
<b>Tableau 15</b> : Répartition des déplacements en fonction des périodes et en nombre de jours.....	35
<b>Tableau 16</b> : Répartition des kilométrages par type de déplacement et en nombre de jours pour les citadines ...	36
<b>Tableau 16</b> : Répartition des kilométrages par type de déplacements et en nombre de jours pour les berlines ...	36
<b>Tableau 18</b> : Modalités de charge-décharge des véhicules électriques en fonction des types de charge.....	39
<b>Tableau 19</b> : Capacités globales (MWh échangeables sur 10 ans) des batteries sur la première vie en fonction des hypothèses de batteries.....	40
<b>Tableau 20</b> : Capacité d'échanges d'énergies des batteries en fonction des hypothèses d'évolution des batteries.....	41
<b>Tableau 21</b> : Niveau de consommation dans chacun des 3 scénarios pour le mix électrique.....	43
<b>Tableau 22</b> : Evaluation du stock de batteries en seconde vie pour les 3 scénarios.....	48
<b>Tableau 23</b> : Modélisation de la seconde vie.....	48
<b>Tableau 24</b> : Facteurs d'émissions utilisés pour l'approche marginale dans l'analyse de la seconde vie des batteries.....	49
<b>Tableau 25</b> : Hypothèses sur le nombre de batteries en seconde vie.....	51
<b>Tableau 26</b> : Liste des sensibilités analysées.....	52

## Liste des tableaux «Résultats»

<b>Tableau 1</b> : Rappel des caractéristiques véhicules et des paramètres du scénario de référence.....	54
<b>Tableau 2</b> : Evolution des impacts des véhicules électriques en comparaison avec les véhicules thermiques en 2016/ mild hybrid en 2030.....	64
<b>Tableau 3</b> : Hypothèses des scénarios de l'étude.....	74
<b>Tableau 5</b> : Potentiel de services rendus au système électrique par les différents scénarios.....	77
<b>Tableau 5</b> : Sensibilité au taux de pertes de 30% des charges rapides.....	84
<b>Tableau 1</b> : Qualité des données.....	86
<b>Tableau 2</b> : Type et fréquence des opérations de maintenance.....	89
<b>Tableau 3</b> : Consommation des ressources fossiles - Indicateur d'impact 2016-2030 des véhicules.....	90
<b>Tableau 4</b> : Consommation de ressources fossiles Indicateur d'impact du parc électrique.....	90
<b>Tableau 5</b> : Contribution au réchauffement global - Indicateur d'impact 2016-2030 des véhicules.....	91
<b>Tableau 6</b> : Contribution au réchauffement global - Indicateur d'impact du parc électrique.....	91
<b>Tableau 7</b> : Potentiel d'acidification - Indicateur d'impact 2016-2030 des véhicules.....	92
<b>Tableau 8</b> : Potentiel d'acidification - Indicateur d'impact du parc électrique.....	92
<b>Tableau 9</b> : Potentiel d'eutrophisation - Indicateur d'impact 2016-2030 des véhicules.....	93
<b>Tableau 10</b> : Potentiel d'eutrophisation - Indicateur d'impact du parc électrique.....	93
<b>Tableau 11</b> : Potentiel de création d'ozone photochimique - Indicateur d'impact 2016-2030 des véhicules.....	94
<b>Tableau 12</b> : Potentiel de création d'ozone photochimique - impact du parc électrique.....	94
<b>Tableau 13</b> : Evolution des indicateurs par rapport au scénario de référence (Mix Transition énergétique).....	96
<b>Tableau 14</b> : Sensibilité des impacts environnementaux à l'évolution des batteries.....	97
<b>Tableau 15</b> : Sensibilité des indicateurs d'impacts à l'évolution du taux de recyclage.....	97
<b>Tableau 16</b> : Indicateurs d'impact selon le taux de VHR et selon les phases du cycle de vie à l'échelle d'un parc de 4,4 millions de véhicules dans le scénario de référence.....	98
<b>Tableau 17</b> : Sensibilité des impacts environnementaux à l'évolution de la consommation unitaire des véhicules à l'usage.....	98
<b>Tableau 18</b> : Sensibilité des indicateurs d'impacts environnementaux à l'évolution du nombre de batterie(s) utilisée(s) en première vie.....	99

## Glossaire

**ACV** : analyse de cycle de vie.

**Batterie Li-Ion NMC** : Les batteries lithium-ion désignent un type d'accumulateur, qui libère de l'électricité par échange réversible des ions lithium entre deux électrodes : une anode et une cathode. Cet échange se fait au sein d'un électrolyte liquide. Les avantages de la batterie lithium-ion sont sa très forte densité énergétique (énergie par unité de volume) et son importante énergie massique (énergie par unité de masse). NMC désigne la chimie de batterie considérée ici et les 3 matières minérales utilisées : Nickel, Manganèse et Cobalt.

**BMS** : « Battery Management System », est un système électronique contrôlant la charge et parfois également la décharge des accumulateurs composant une batterie. C'est un élément indispensable qui garantit à la fois la sécurité et la durée de vie de la batterie.

**Capacité totale de la batterie** : la capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète, exprimée ici en Wh.

**Charge accélérée** : puissance d'une charge à 22 kW.

**Charge décalée** : opération qui consiste à différer la charge d'un appareil (ex : un véhicule) de manière automatique ou manuelle.

**Charge naturelle** : charge par défaut d'un appareil au réseau électrique.

**Charge normale** : puissance d'une charge à 7 kW.

**Charge ultrarapide** : puissance d'une charge à 150 kW.

**Crédits recyclage** : le crédit de recyclage est le pourcentage de déchets récurrents récupérés dans un processus de recyclage effectué par dans un site de recyclage propre.

**CU** : consommation unitaire des véhicules par kilomètre parcouru.

**Cycle de la batterie** : un cycle correspond à une séquence de charge et décharge.

**Densité énergétique** : la densité, ou énergie spécifique, correspond à la quantité d'énergie (Wh/kg) que la batterie peut restituer par rapport à sa masse.

**ENR** : énergies renouvelables.

**Etat de charge de la batterie (State of Charge/SoC)** : il correspond à la capacité restante dans la batterie en pourcentage de la capacité initiale.

**Etat de santé (State of Health /SoH)** : il correspond à la durée de vie restante dans l'élément/ la batterie en pourcentage de la durée de vie initiale.

**GaBi / thinkstep** : GaBi est un des logiciels de référence utilisé pour réaliser les analyses de cycle de vie. Il est développé par thinkstep. Ce logiciel permet d'utiliser et de traiter plusieurs bases de données, dont celle de GaBi/ Thinkstep ou EcoInvent. La base de données GaBi est reconnue dans le secteur de l'automobile notamment. EcoInvent est reconnue par les professionnels de l'ACV pour la qualité des données, en ce qui concerne la provenance des données leur mode d'obtention, d'évaluation ou d'intégration dans les calculs. Elles sont évaluées par des experts indépendants et se basent exclusivement sur des informations industrielles provenant de groupements d'industriels, de rapports internationaux d'experts, de publications scientifiques, de rapports statistiques, de rapports environnementaux d'associations ou d'entreprises.

**GES** : Gaz à effet de serre (dont fait partie le CO<sub>2</sub>).

**HBefa/ The Handbook Emission Factors for Road Transport** : Le référentiel sur les facteurs d'émission pour les transports routiers fournit des facteurs d'émission pour toutes les catégories de véhicules actuelles (PC, LDV, poids lourds, autobus urbains, autocars et motocycles), chacune divisée en diffé-

rentes catégories, pour une grande variété de situations de circulation. Les facteurs d'émission pour tous les polluants réglementés et non réglementés les plus importants ainsi que la consommation de carburant et le CO<sub>2</sub> sont inclus.

**VT - Véhicule thermique** : moteur alimenté avec de l'essence, du gazole, éventuellement mélangé à des biocarburants.

**Mild hybrid** : le terme désigne l'ajout d'une propulsion électrique sur un véhicule à traction thermique (essence ou diesel), avec des niveaux de puissance électrique relativement faible.

**NEDC** : Nouveau cycle européen de conduite (New European Driving Cycle), est un cycle de conduite automobile conçu pour reproduire en laboratoire les conditions rencontrées sur les routes européennes. Ce cycle de test sera remplacé par un nouveau système (WLTP) d'ici la fin de l'année 2017.

**Optimum carbone** : plage horaire où le contenu carbone du système électrique est le plus faible.

**PEMS** : Portable emissions measurement system est un système de mesure des émissions embarqué sur le véhicule qui analyse tout le flux des gaz d'échappement.

**PPE** : Programmation pluriannuelle de l'énergie.

**Profondeur de décharge de la batterie (Depth of discharge/DoD)** : elle est habituellement exprimée comme un pourcentage de la capacité de la batterie, et correspond à la part de l'énergie de la batterie qui a été utilisée.

**Consommation en conditions réelles** : valeur réelle de consommation des véhicules sur route. Ces valeurs sont mesurées à l'aide d'un appareil équipé sur le véhicule (PEMS) ou à partir des données fournies par les automobilistes.

**SDMP** : stratégie de développement de la mobilité propre.

**Seconde vie des batteries** : après 10 ans, la batterie est reconditionnée et utilisée pour stocker de l'électricité, par exemple dans un bâtiment.

**Services au système électrique** : ces services permettent aux gestionnaires de réseaux électriques de maintenir la fréquence et la tension du réseau et de gérer l'équilibre et les congestions.

**SNBC** : stratégie nationale bas carbone.

**Tank to Wheel (TtW)** : «du réservoir à la roue», désigne l'étape de l'ACV mesurant les impacts liés à la combustion du carburant nécessaire pour rouler (pour les moteurs thermiques).

**Véhicules électriques** : inclus les véhicules électriques et les véhicules hybrides rechargeables.

**VE** : véhicule 100% électrique.

**VE-REX** : véhicule électrique, équipé d'un prolongateur d'autonomie (range extender).

**VHR** : véhicule hybride rechargeable.

**V2G** : le vehicle-to-grid décrit un système dans lequel les véhicules électriques rechargeables, tels que les voitures électriques (VE) et les hybrides rechargeables (VHR), communiquent avec le système électrique en renvoyant l'électricité vers le réseau ou en réduisant leur taux de charge pour éviter les pointes de consommation. Il s'agit d'un échange bidirectionnel entre le véhicule et le système électrique.

**Well to Tank (WtT)** : «du puits au réservoir», désigne l'étape de l'ACV mesurant les impacts depuis l'extraction des matières premières énergétiques jusqu'au réservoir/ batterie du véhicule.

# MÉTHODOLOGIE

**Cette étude confirme que les atouts environnementaux du véhicule électrique sont intrinsèquement liés à la mise en œuvre de la transition énergétique et écologique.** Les impacts de ce véhicule sur le climat et l'environnement varient en fonction du mix électrique qui est utilisé pour la charge des véhicules, et des externalités qui y sont liées (émissions de CO<sub>2</sub>, déchets radioactifs). Les atouts environnementaux des véhicules électriques pour lutter contre le changement climatique se confirment à horizon 2030 dans le cas où les objectifs de la loi de transition énergétique sont atteints, comme dans le scénario 1, et se renforcent dans un scénario ambitieux de développement des énergies renouvelables.

**Dans un contexte de forte croissance du marché des véhicules électriques d'ici à 2030, la réduction des impacts de l'étape de fabrication est une des conditions de la soutenabilité de la filière.** Les 4 leviers principaux identifiés pour maîtriser et réduire cet impact se situent au niveau des activités d'extraction de matières minérales, de l'efficacité des modes de production, de l'évolution des batteries -efficacité, taille, usage- et du renforcement des pratiques de recyclage.

**Par ailleurs, les atouts environnementaux des véhicules électriques peuvent être accentués, selon l'analyse proposée ici, en maximisant l'usage des batteries pour la mobilité (partage de véhicules et augmentation du kilométrage) et / ou en utilisant la fonction de stockage, pour rendre des services au système électrique («V2G»).** L'analyse a permis de mesurer le bénéfice additionnel des services au système électrique dans les 3 scénarios proposés.

**Enfin, l'étude met en avant l'intérêt de l'usage des batteries en seconde vie pour le stockage de l'électricité d'origine renouvelable.** Cet usage est un moyen d'optimiser les ressources naturelles, et pourra être un outil pour accélérer la transition énergétique au-delà de 2030. Le niveau d'ambition du déploiement de l'électromobilité en France d'ici 2030 définira le potentiel de stockage disponible en 2040. Les 3 scénarios illustrent des chemins contrastés de ce point de vue.

Si elle est associée à une maîtrise de la consommation énergétique (efficacité et sobriété), à une gestion intelligente de la charge, et au développement des capacités de stockage, l'électromobilité peut jouer un rôle dans la transition énergétique. Elle peut accompagner au développement des énergies renouvelables et à une sortie progressive des énergies fossiles et nucléaires.

Par cette démarche exploratoire, les partenaires impliqués ouvrent résolument un champ de réflexion, de dialogue et de collaboration entre le monde de la mobilité et celui de l'énergie.

# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

## 1.1. Contexte

La transition écologique doit désormais donner le cap de nos politiques de développement, aux niveaux national et international. La lutte contre les dérèglements climatiques et la préservation de nos ressources naturelles selon des modes coopératifs et solidaires sont les conditions indispensables du vivre ensemble et de la paix dans le monde au 21<sup>ème</sup> siècle.

La France s'est dotée en 2015 d'une loi de transition énergétique qui fixe des objectifs en matière de lutte contre le changement climatique, de transition vers les énergies renouvelables et de mobilité durable.

Le transport est un des secteurs d'intervention prioritaire du plan climat lancé par le gouvernement en juillet 2017, qui vise la fin de la vente des véhicules diesel et essence en 2040. L'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre du transport en France est fixé à 29% d'ici 2028 par rapport à l'année 2013<sup>1</sup>. Cela représente un effort important pour ce secteur, qui émet environ un tiers des émissions françaises de gaz à effet de serre (GES). La publication récente de la stratégie européenne pour une mobilité à faibles émissions<sup>2</sup> et les réglementations proposées par le paquet transport 2017<sup>3</sup> vont également dans le sens d'une sortie progressive des énergies fossiles dans le transport de particuliers.

La lutte contre le changement climatique nécessite de sortir de l'addiction des transports aux ressources fossiles. Ce secteur n'a pas pleinement entamé sa transition énergétique et dépend encore largement du pétrole et de ses dérivés, dont il est le plus gros consommateur. Le recours aux énergies d'origine renouvelable s'impose donc comme une nécessité dans la transition vers une mobilité durable. Elle implique également une transformation des moyens utilisés pour se déplacer, des véhicules particuliers comme des transports collectifs, et des usages et des pratiques de chacun.

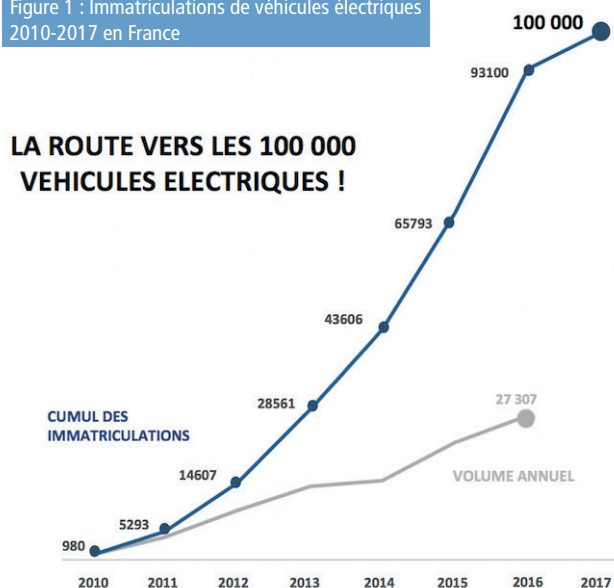
Dans ce contexte, le véhicule électrique est une des solutions pour assurer la transition bas-carbone. La loi de transition énergétique fixe les ambitions de la

France en matière de mobilité électrique : convertir une part significative du parc automobile – plus de 4 millions de véhicules électriques (VE) et de véhicules hybrides rechargeables (VHR) – d'ici à 2030.

En mars 2017, le marché français des véhicules particuliers et utilitaires 100% électriques a franchi le cap des 100 000 immatriculations cumulées depuis 2010, date de lancement de la nouvelle génération de véhicules électriques. Ce succès est notamment porté par des politiques d'appui à la filière et à l'achat (bonus-malus, notamment) et s'ancre de fait dans un contexte de prise de conscience croissante des enjeux environnementaux. En effet, les véhicules électriques n'émettent pas à l'échappement, ce qui leur confère un avantage net par rapport aux véhicules thermiques dans la lutte contre la pollution de l'air et le changement climatique.

Pour autant, le véhicule électrique devra trouver sa place dans un écosystème multimodal, aux côtés des autres solutions de mobilité. Pour cela, son déploiement devra garantir une efficacité sociale, pour répondre aux besoins quotidiens de mobilité, et environnementale, pour réduire les externalités négatives sur le climat et les écosystèmes. Si les atouts des véhicules électriques pour aider à la limitation de la pollution de l'air, en ville notamment, sont aujourd'hui largement connus, l'impact de leur fabrication, et en particulier des batteries, mérite d'être posée et évaluée dans le cadre de la transition écologique.

Figure 1 : Immatriculations de véhicules électriques 2010-2017 en France



source : AVERE 2017

1 – 3<sup>ème</sup> budget carbone défini par la stratégie nationale bas carbone-SNBC, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone>

2 – En effet, le stock de véhicules en 2030 est un point de passage vers 2050.

3 – Cf. Europe on the Move: Commission takes action for clean, competitive and connected mobility, [https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-05-31-europe-on-the-move\\_en](https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-05-31-europe-on-the-move_en)



Des controverses subsistent quant à la demande additionnelle d'électricité des véhicules électriques dans un contexte de nécessaire maîtrise des consommations et de réduction de la production d'électricité d'origine nucléaire. Par ailleurs, le déploiement des énergies renouvelables décentralisées et les pratiques d'autoconsommation et de stockage soulèvent de nouveaux défis et des opportunités pour la gestion du système électrique. Les batteries «mobiles» peuvent-elles apporter un service de flexibilité à un système électrique «en transition»? Quel est le service potentiel rendu par les batteries en seconde vie, utilisées comme moyen de stockage stationnaire dans le bâtiment? Les partenaires impliqués dans cette étude ont souhaité apporter des éléments de réponse et ouvrir la réflexion sur la mobilité électrique en l'intégrant de manière résolue dans la transition énergétique.

---

## 1.2. Objectifs

Cette étude a pour but d'évaluer les risques et les opportunités environnementales liés au déploiement des véhicules électriques, dans le cadre prédéfini de la loi de transition énergétique de 2015. Pour cela, la projection à 2030 considère en premier lieu les objectifs fixés pour le parc automobile, c'est à dire 4,4 millions de véhicules électriques (dont deux tiers d'hybrides) ainsi que pour le mix électrique (comprenant 39% d'ENR). Dans ce contexte, le projet poursuit trois objectifs :

**Objectif 1** : évaluer le bilan environnemental de 8 véhicules thermiques et électriques, en 2016 et à l'horizon 2030. La projection est réalisée en tenant compte notamment de l'évolution technologique des véhicules (des batteries en particulier), et du mix électrique.

**Objectif 2** : identifier les potentiels du *vehicle-to-grid* pour optimiser l'usage des véhicules électriques en 2030 et fournir des services au système électrique.

**Objectif 3** : identifier le potentiel de l'utilisation des batteries en deuxième vie, en tant que moyen de stockage au service du développement des énergies renouvelables.

---

## 1.3. Démarche

Dans cette perspective, la Fondation pour la Nature et l'Homme et la European Climate Foundation ont rassemblé des ONG et des acteurs institutionnels et privés au sein d'un comité de pilotage. Le secteur de l'automobile a été représenté par Renault et l'AVERE France, les fabricants de batteries par Saft. L'ADEME et RTE ont apporté leur expertise dans le domaine de l'énergie et de la gestion des réseaux d'électricité. Cinq ONG ont été représentées : le Réseau Action Climat, le WWF, le Comité de Liaison Énergie Renouvelable (CLER), la Fondation pour la Nature et l'Homme et la European Climate Foundation. La prospective 2030 a été réalisée par Carbone 4. Afin de valider la robustesse de la méthodologie abordée, quatre experts indépendants ont effectué une revue critique de l'étude.

Le travail s'est déroulé en trois étapes successives :

### a) L'analyse du cycle de vie

Une analyse du cycle de vie sur 8 véhicules, électriques, hybrides et thermiques, a été réalisée. Elle permet de mesurer leur empreinte environnementale, à chaque étape, de l'extraction des matériaux jusqu'à la fin de vie. Le potentiel de réchauffement climatique et la consommation de ressources fossiles ont été évalués, ainsi que les potentiels d'acidification, d'eutrophisation, et de création d'ozone photochimique.

### Pourquoi une analyse du cycle de vie (ACV) ?

Alors que le déploiement du véhicule électrique ne fait pas l'unanimité au sein de la société civile française, il est essentiel de pouvoir fonder les analyses sur une méthode la plus fine et la plus large possible. Il a donc été choisi de recourir à une analyse de cycle de vie permettant d'identifier les impacts environnementaux à chaque étape de la vie du véhicule : de la fabrication du véhicule et de sa batterie, jusqu'à la fin de vie et au recyclage. Cela a permis de prendre en compte différents indicateurs, tels que la contribution au changement climatique et les potentiels d'acidification et d'eutrophisation. Enfin, l'analyse de cycle de vie est à même de fournir un socle solide à la projection 2030 et d'identifier les risques et les opportunités environnementales du véhicule électrique.

### Une ACV attributionnelle

L'analyse de cycle de vie réalisée dans le cadre de cette étude est attributionnelle. Elle décrit les impacts environnementaux attribués aux véhicules tout au long de leur cycle de vie. Elle n'évalue pas les conséquences des décisions ni les effets rebonds potentiels liés au développement de l'électromobilité

[aux infrastructures notamment, au déploiement des smart grids, ou à l'extraction de minerais]. L'ACV est intégrée dans une prospective, dites «élargie», à horizon 2030. Sont pris en compte ici l'influence des véhicules électriques sur la consommation électrique ainsi que la fonction secondaire des batteries. C'est-à-dire le stockage, pour rendre des services au système électrique (via le V2G) et au-delà de la vie du véhicule (en seconde vie). Les conséquences du V2G et du stockage des ENR sur l'évolution du mix électrique ne sont pas évaluées, le mix électrique étant une donnée d'entrée au modèle.

### **La comparaison entre les véhicules électriques, hybrides et thermiques**

La comparaison entre les différents véhicules, électriques et thermiques, en 2016 et 2030, n'est pas un objectif de l'étude. Il a été choisi de maintenir les véhicules thermiques dans l'analyse, afin de fournir, sur certains points précis, des éléments de repère : sur le potentiel de réchauffement global notamment, ou la consommation de ressources fossiles. Ces points de comparaison alimentent l'analyse sur la trajectoire de transition énergétique.

Cette étude appuie des affirmations comparatives entre différents types de motorisation. Elle n'a pas pour but de comparer des produits existants.

### **b) La construction des scénarios 2030**

Dans le cadre de la projection trois scénarios de développement de l'électromobilité à horizon 2030 ont été construits : 1) *Ambition transition énergétique* 2) *Accélération en faveur des énergies renouvelables* et 3) *Renoncement politique* et les risques environnementaux associés. (cf. Section 3, «Les scénarios»).

### **2030 : un point d'étape dans la transition écologique**

2030 représente un point de passage dans la transition écologique, une étape dans le déploiement des renouvelables, la transformation du système de mobilité, 2050 étant l'horizon plus généralement partagé pour traiter des enjeux environnementaux et du climat en particulier. 2030 a été choisi ici comme horizon prospectif pour plusieurs raisons et en particulier les incertitudes au-delà de cet horizon sur les technologies de batteries, la composition matière des véhicules, les niveaux de consommation. Néanmoins, les résultats 2030 doivent être lus comme des résultats intermédiaires dans la transition écologique. A titre d'exemple, les estimations de services potentiels au

système électrique en 2030 varient peu entre les scénarios, mais le calcul du potentiel, 10 ans plus tard, en 2040, aboutit à des résultats très différenciés entre les scénarios.

### **c) L'évaluation des services potentiels au système électrique permis par les batteries embarquées et de seconde vie**

Si la batterie a pour fonction première d'apporter l'énergie nécessaire au véhicule pour se déplacer, elle peut également apporter des services potentiels au système électrique, par sa fonction de stockage. Une estimation des échanges entre un parc de plusieurs millions de véhicules et le système électrique a été réalisée, en prenant en compte les opportunités offertes par la charge intelligente et en identifiant les risques liés à la gestion de cette charge (ex : pendant les pics de consommation). Cette estimation a permis d'identifier le potentiel pour les services au système électrique. Chaque scénario analyse donc à la fois le gain environnemental et la réserve d'énergie potentielle stockée et redistribuée par les véhicules (V2G) et lors de la seconde vie des batteries.

---

## **1.4. Applications envisagées et public concerné**

La présente étude se situe dans la continuité des travaux menés en 2015 et publiés sous le titre «En route pour un transport durable<sup>4</sup>», avec le soutien de la European Climate Foundation. Ces travaux avaient permis d'identifier les bénéfices macro-économiques de scénarios de transition bas-carbone dans les transports et fourni des indications précises quant à l'empreinte carbone, aux émissions d'oxydes d'azote et de particules polluantes, des véhicules à l'usage. Par ailleurs, une analyse plus détaillée a quantifié les bénéfices de l'intégration des véhicules rechargeables dans les réseaux de distribution et les défis relatifs à la gestion de la charge électrique. Poursuivant la réflexion, cette étude relève d'une démarche exploratoire, et a vocation à éclairer les perspectives et à approfondir les travaux sur le potentiel des véhicules électriques à contribuer à la transition écologique en France et en Europe.

Ce rapport technique est publié en complément de la synthèse «*Le véhicule électrique dans la transition écologique en France* », qui est diffusée aux professionnels et décideurs politiques par les partenaires.

4 – <https://www.camecon.com/how/our-work/en-route-pour-un-transport-durable/>

## 2. CHAMP DE L'ÉTUDE

> Le champ de cette étude couvre l'ensemble de la méthode d'analyse de cycle de vie et de la projection à 2030.

### 2.1. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définit la fonction étudiée en 2016 et en 2030 en répondant aux questions : *Quoi ? Comment et pour combien de temps ? Combien ?*

- **Quoi ?** Transporter des personnes dans un véhicule.
- **Comment et pour combien de temps ?** 10 ans, avec 1 batterie utilisée pendant cette période. En 2016, les véhicules hybrides roulent 50% des kilomètres effectués en mode thermique et 50% en mode électrique.
- **Combien ?** L'unité fonctionnelle est différenciée entre deux gammes de véhicules, segment des citadines et segment des berlines, sur un critère unique : le nombre de kilomètres parcourus pour déplacer des passagers.

**Nombre de kilomètres :**

- Pour les citadines : 150 000 km (15 000 par an)
- Pour les berlines : 250 000 km (25 000 par an)

Le véhicule lui-même définit le flux de référence.

L'étude prend en considération une fonction secondaire, qui est la fonction de stockage du véhicule, et lui permet de rendre des services au système électrique. La fonction première reste la mobilité, et la fonction secondaire n'est considérée qu'en 2030. C'est la raison pour laquelle l'unité fonctionnelle considérée ici est uniquement le transport des personnes. Ces deux fonctions identifient deux périmètres différents : la mobilité d'une part, le stockage de l'autre. La projection 2030 prend en compte les deux fonctions et donc les deux périmètres.

### 2.2. Véhicules considérés

#### a) Deux segments

L'étude analyse les impacts environnementaux de 6 archétypes de véhicules électriques et 2 archétypes de véhicules thermiques neufs. Tous diffèrent par leur motorisation et appartiennent à deux segments distincts : le segment des citadines, qui comprend quatre voitures, et le segment des berlines, qui comprend trois voitures et un véhicule utilitaire sport (SUV). Un véhicule SUV-4x4 a été analysé mais n'appartient pas au segment des berlines. Au sein de chaque gamme la comparabilité des différentes motorisations a été recherchée, en sélectionnant des véhicules à usage similaire. Ces segments de véhicules ne peuvent être comparés et sont donc présentés séparément.

#### Archétype des véhicules

Huit archétypes de véhicules sont présentés :

- un véhicule citadin essence (VT) dont l'archétype possède une hybridation légère (mild-hybrid) en 2030.
- Un véhicule berline diesel (VT) dont l'archétype possède une hybridation légère (mild-hybrid) en 2030.
- Un véhicule citadin hybride rechargeable à essence (VHR).
- Un SUV hybride rechargeable à essence (VHR).
- Un 4x4 SUV hybride rechargeable à essence (4x4 VHR).
- Un véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie (VE-REX).
- Un véhicule citadin 100% électrique.
- Un véhicule berline 100% électrique.

N.B : le SUV-4X4 hybride essence est un véhicule de grand format dont la masse est largement supérieure aux autres archétypes. Ce véhicule est conservé à titre illustratif : bien que minoritaire sur le marché français, les ventes de ce type de véhicule sont en forte croissance.

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES DE LA GAMME CITADINE EN 2016				
Véhicules	Thermique	VHR	VE-REX	VE
Motorisation	Essence	Hybride : essence électrique	Electrique + prolongateur d'autonomie	Electrique
Masse des véhicules 2016	1 138 kg	1 568 kg	1 384 kg	1 465 kg
Norme Euro	6	6	6	NA

TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES DE LA GAMME BERLINE EN 2016				
Véhicule	Thermique	VHR	VE	VHR SUV 4X4
Motorisation	Diesel	Hybride	Electrique	Hybride
Masse des véhicules (Source A2Mac1)	1 500 kg	1 800 kg	1 955 kg	2 360 kg
Norme Euro	6	6	NA	6

Le choix d'un moteur essence pour la gamme thermique urbaine et d'un moteur diesel pour la gamme thermique berline tient à la nature particulière du marché automobile français. Avec le rééquilibrage des taxes diesel-essence en France, le marché français des berlines thermiques en 2030 pourrait néanmoins être moins dominé par les moteurs diesel.

## b) Profils de roulage

Pour évaluer les impacts en phase d'usage des motorisations thermiques, il a été choisi de prendre en compte les émissions en conditions réelles de conduite (real-world), plutôt que de se baser sur les normes NEDC (cf. partie 5.4). Pour permettre cela, des profils de roulage pour chaque gamme de véhicules ont été développés. Ils représentent les habitudes d'utilisation des automobilistes en fonction du type de véhicule et ont été construits à partir de sondages réalisés auprès des automobilistes européens. Le tableau ci-dessous représente la part du roulage réalisé en moyenne par les automobilistes français en ville, en zone périurbaine ou rurale, sur autoroute, sur les deux gammes de véhicules.

TABLEAU 3 : PROFILS DE ROULAGE		
	Gamme citadine	Gamme berline
Ville	41%	26%
Route	39%	35%
Autoroute	20%	39%

## c) Les batteries

Les batteries des véhicules électriques ont une chimie lithium-ion NMC (nickel-manganèse-cobalt). Dominantes aujourd'hui sur le marché des véhicules électriques, elles offrent une grande efficacité énergétique. Si d'autres technologies, dotées une plus grande efficacité, peuvent apparaître dans les années à venir, elles ne sont pas attendues sur le marché de masse avant 7 à 10 ans. Il est donc fortement envisageable que la technologie lithium-ion reste fortement présente sur le marché de masse au moins jusqu'en 2030.

L'absence de données disponibles sur la composition matière des batteries pour les huit véhicules a amené le groupe d'experts à considérer une seule chimie de batterie pour tous les véhicules. En 2016, entre les différents véhicules étudiés, seule la masse de la batterie (et des matières contenues) change selon l'application d'un ratio, calculé à partir de la batterie de la citadine 100% électrique. En 2030, au regard des évolutions observées et de la diversification des produits batteries, trois variantes de la chimie NMC ont été considérées. Ces variantes sont caractérisées par des ratios de matières différents :

- la variante de chimie 1 est appliquée aux batteries des véhicules thermiques mild-hybrid. La batterie sert essentiellement à réaliser des gains d'efficacité sur la chaîne de traction et n'est pas rechargeable par l'automobiliste.
- La variante de chimie 2 appliquée aux batteries des citadines électriques et hybrides rechargeables.
- La variante de chimie 3 est appliquée aux batteries électriques des berlines hybrides rechargeables.

*Les hypothèses de densité, de capacité et de masse des batteries sont décrites de manière détaillée dans la partie 6.3 : «Modélisation prospective 2030».*

---

## 2.3. Considération de la fonction secondaire des batteries pour stocker de l'énergie

Au-delà des impacts liés à la fonction mobilité des véhicules, la projection 2030 prend en compte les bénéfices potentiels de l'usage des batteries en première vie pour stocker l'électricité, et ainsi rendre des services au système électrique. Au périmètre «mobilité» est ainsi adjoint dans la projection 2030 un périmètre «stockage».

### a) Les services au système électrique en première vie

La première vie désigne la période pendant laquelle le véhicule roule. Sa durée est estimée dans cette étude à 10 ans. La batterie a alors pour fonction principale de tracter le véhicule.

Quand il est stationné et en charge, le véhicule peut stocker de l'énergie, mais également rendre de l'électricité au réseau. On parle alors de charge «bidirectionnelle» [V2G].

L'étude part de l'hypothèse que les batteries mobiles des véhicules en stationnement peuvent apporter de la flexibilité au système électrique. Elle évalue le service énergétique potentiel en 2030 d'un parc de plusieurs millions de véhicules (par exemple 4,4 millions dans le scénario 1), par le biais d'une modélisation prospective.

Cette modélisation prend en compte des profils de mobilité et de charge (cf. Partie 6), en fonction du parc électrique. Ce potentiel est plus ou moins mobilisé selon une hypothèse sur le taux de V2G, correspondant à la proportion des charges qui peuvent être bidirectionnelles (quand les véhicules et les infrastructures le permettent).

### b) La fonction de stockage en seconde vie

La seconde vie consiste à utiliser la batterie du véhicule électrique après qu'elle ait perdu une partie de sa capacité initiale, comme moyen de stockage stationnaire d'électricité, par exemple dans le bâtiment.

Le passage de la première à la seconde vie est ici considéré comme « direct ». C'est-à-dire que la seconde vie intervient après la phase de collecte des batteries dont la capacité initiale totale est réduite de 20%. La totalité des batteries (100%) de véhicules est soumise à la responsabilité des constructeurs et est considérée ici comme collectée<sup>5</sup>.

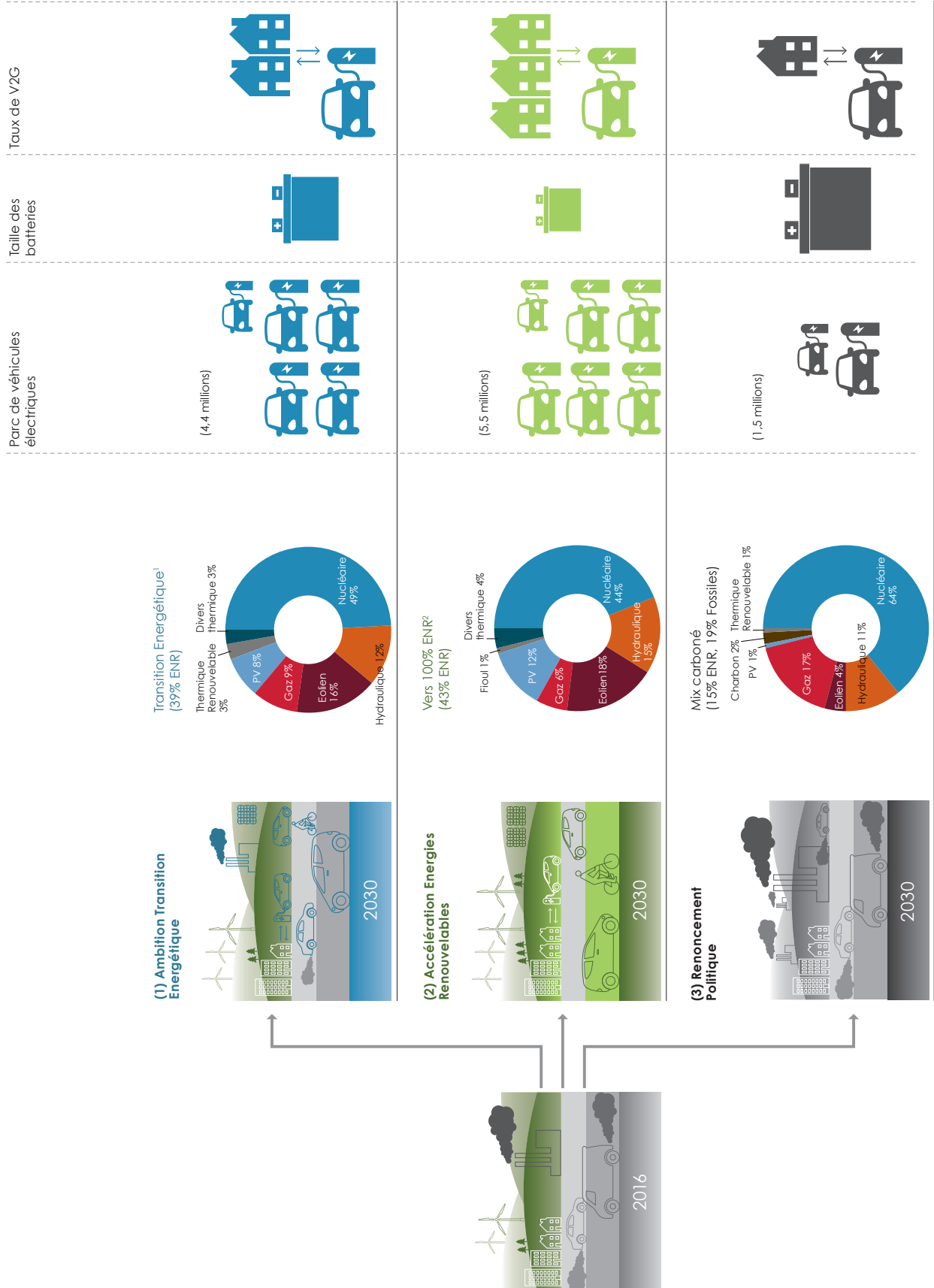
La batterie est par la suite reconditionnée dans des packs batteries adaptés à l'application en seconde vie. L'absence de données robustes n'a pas permis d'intégrer les impacts liés au reconditionnement (qui sont liés essentiellement à la réinstallation d'un système de gestion de la batterie - BMS). Les impacts sont considérés comme négligeables par rapport aux gains attendus en seconde vie. Les équipements annexes nécessaires au bon fonctionnement de la batterie, ainsi que le test préalable avant l'installation en mode stationnaire pour son usage de seconde vie, ne sont pas pris en compte dans cette étude.

---

5 – En Europe, la principale législation qui régit les batteries est la directive (2006/66/CE) du parlement européen et du conseil du 6 septembre 2006 relative aux piles et aux accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:l21202&from=FR> Même si toutes les batteries sont sous la responsabilité du constructeur, il peut être estimé qu'une part de 5% soit « perdue », exportée par exemple. Ce taux de perte n'a pas été intégré aux hypothèses ici.

# 3. LES SCÉNARIOS

Figure 2 : vue d'ensemble des scénarios 2030



---

### 3.1. Principe de construction des scénarios contrastés

L'étude a permis d'analyser les impacts environnementaux des véhicules thermiques et électriques en 2016 et 2030 en France. Afin de comprendre l'effet de multiples paramètres, technologiques et réglementaires d'ici à 2030, quatre scénarios ont été développés :

- «Loi de transition énergétique» - Scénario de référence
- «Ambition transition énergétique»
- «Accélération en faveur des énergies renouvelables»
- «Renoncement politique»

**Le scénario de référence** est défini à partir des tendances observées sur les évolutions des véhicules et des objectifs fixés par la France dans la loi de transition énergétique, la Programmation pluriannuelle de l'énergie et la Stratégie de mobilité propre : le mix électrique intègre 39% de renouvelables en 2030, et 4,4 millions de véhicules électriques dont les deux tiers d'hybrides rechargeables. Ce scénario évalue les impacts dans le cas où la France atteint ses objectifs. Ce scénario de référence à 2030 couvre le périmètre «mobilité» et ne prend pas en compte le périmètre «stockage», et exclu donc les services potentiels au système électrique.

A partir du scénario de référence, sont proposés trois scénarios contrastés de développement du véhicule électrique en France à l'horizon 2030, intégrant le potentiel de services au système électrique. Ils ont été construits en considérant un ensemble de paramètres, pour lesquels, des hypothèses ont été définies :

1. **mix électrique** : part des énergies renouvelables, fossiles et du nucléaire;
2. **efficacité énergétique** des modes de production (phase de fabrication) ;
3. **consommation énergétique** des véhicules à l'usage (moteurs thermiques) ;
4. **évolution des batteries** : cette évolution est estimée à partir de la performance, de la capacité et de la masse;
5. **recyclage** : celui-ci est mesuré à travers le taux de recyclabilité des batteries (la fraction des matériaux qui sont recyclés ou valorisés en fin de vie des batteries);
6. **parc de véhicules électriques** : nombre de véhicules électriques et hybrides rechargeables considérés;
7. **composition du parc de véhicules électriques** : part des véhicules électriques et des hybrides rechargeables;
8. **réseaux intelligents** : le taux de charge intelligente définit la part des charges qui sont pilotées en décalant le moment de la charge afin d'éviter l'émission de gaz à effet de serre;
9. **infrastructures de recharge** : le taux d'accès à la prise en journée estime la part des véhicules ayant accès à une prise en journée pour recharger le véhicule;
10. **V2G** : le taux de V2G mesure la proportion des charges qui peuvent être bidirectionnelles (quand les véhicules et les infrastructures le permettent)

TABLEAU 4 : LOGIQUE DE CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS

Paramètre	Variable (unité)	Hypothèse du scénario de référence	Scénario 1 : « Ambition transition énergétique »	Scénario 2 : « Accélération en faveur des énergies renouvelables »	Scénario 3 : « Renoncement Politique »
1. Mix électrique	Part respective des différentes sources énergétiques (en %)	PPE	=	+ ENR	+ Fossiles/ - ENR
2. Efficacité énergétique des modes de production (phase de fabrication)	Gains d'efficacité énergétique entre 2016 et 2030 (en %)	Gains de 2%/an	=	=	-
3. Consommation thermique des véhicules (phase d'usage)	Évolution de la consommation unitaire (en %)	-35% en 2030	=	=	+
4. Évolution des batteries	Masse et capacité des batteries (en Kg et en Wh)				
5. Recyclage	Taux de recyclabilité de la batterie (en%)	50% actuel	+	++	=
6. Parc de VE-VHR	Volume du parc (en millions de véhicules)	4,4 millions	=	+	-
7. Composition du parc	Part des véhicules hybrides (en %)	67%	-	-	=
8. Réseaux intelligents	Taux de charge intelligente (en %)	Aucune	++	+++	+
9. Infrastructures	Taux d'accès à la prise en journée (en %)	50%	=	+	-
10. V2G	Taux de V2G (en %)	Aucune	++	++	+

= : l'hypothèse est équivalente à celle du scénario de référence;

- : l'hypothèse est en baisse (ex. batteries de taille/ capacité réduite dans le scénario 2; part des véhicules hybrides rechargeables inférieure dans les scénario 1 et 2 par rapport au scénario de référence).

+, ++ et +++ : l'hypothèse revêt une hausse plus ou moins importante par rapport au scénario de référence (ex. le taux de recyclabilité des batteries est plus important dans le scénario Accélération en faveur des énergies renouvelables que dans le scénario de référence).

ddd

L'étude propose ainsi trois scénarios à partir d'une trajectoire de référence qui est celle de la transition énergétique. Ils n'ont pas vocation à fournir des prévisions 2030. Chacun propose une vision cohérente d'un développement des véhicules électriques dans un contexte énergétique, technique et politique donné. Le caractère récent de certaines technologies a amené le groupe de travail à assumer un certain nombre d'incertitudes sur l'ampleur des évolutions futures.

Ces scénarios visent à mettre en lumière les risques (liés au manquement des objectifs de la loi par exemple) et à mesurer les opportunités (liées au déploiement des ENR, à un renforcement des pratiques de recyclage, aux services rendus au système électrique par les batteries mobiles et en seconde vie).



---

### 3.2. Scénario de référence « Loi de transition énergétique »

Ce scénario est fondé sur les objectifs stricts de la loi, et les tendances observées depuis plusieurs années. Il n'inclut pas d'utilisation du V2G, ni des batteries en seconde vie. Il est un point de référence.

Le parc de véhicules électriques est défini sur la base du scénario proposé par la Stratégie nationale de mobilité propre, soit 4,4 millions en 2030, dont deux-tiers de véhicules hybrides (VHR). Le mix électrique satisfait les objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie à court terme, et les objectifs de la politique énergétique française à moyen terme (part des productions nucléaire et renouvelable notamment). Par ailleurs, la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage relative à une amélioration des niveaux de consommation des motorisations thermiques des nouveaux véhicules est de l'ordre de 3,9% par an entre 2015 et 2030<sup>6</sup>. Les gains d'efficacité énergétique sur la production des véhicules et des batteries sont fixés à 2% par an et correspondent à la poursuite des gains observés ces 10 dernières années sur les chaînes d'approvisionnement (source constructeur). L'évolution des batteries est considérée tendancielle et est caractérisée par une amélioration de la densité énergétique et des performances. Cette hypothèse est cohérente avec une tendance à l'accroissement de la masse des packs batteries observée depuis 2010. Le taux de recyclage correspond à la législation qui assure un taux de recyclage de 50% de masse nette des matières recyclées.

---

### 3.3. Le scénario 1 « Ambition transition énergétique »

Ce scénario est une optimisation du scénario de référence. Il intègre notamment les services au système électrique en première vie, et l'usage en seconde vie des batteries. Ce scénario propose d'intégrer pleinement les transitions, énergétique et de mobilité durable.

Dans ce scénario, les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) sont mis en œuvre et le déploiement du véhicule électrique est optimisé. Si le parc de véhicules électriques reste estimé à 4,4 millions en 2030, la part de VE passe à 50%. L'augmentation du nombre de véhicules rechargeables s'accompagne du développement du réseau d'infrastructures de recharges d'ici à 2030. Le nombre de bornes de recharges se multiplie chez les particuliers et sur le lieu de travail. Le cadre réglementaire est

plus favorable à l'amélioration des modes de production et au recyclage des matières qui est fixé à 70% de la masse nette des matières recyclées. L'augmentation de l'efficacité des batteries permet une baisse ou une maîtrise de leur masse, allant de pair avec une évolution tendancielle des capacités. Comme dans le scénario de référence, la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage des nouveaux véhicules thermiques est cohérente avec une amélioration annuelle de l'ordre de 3,9% par an entre 2015 et 2030. Les charge de type V2G se développent progressivement pour représenter 30% des charges en 2030.

---

### 3.4. Le scénario 2 « Accélération en faveur des énergies renouvelables »

Ce scénario s'inscrit dans une trajectoire 100% renouvelable en 2050, il optimise les potentiels des véhicules électriques pour soutenir le réseau électrique et le stockage des énergies renouvelables dans un contexte de baisse de la consommation globale d'électricité. Résolument préoccupé par la nécessité de préserver les ressources naturelles, il mise sur la sobriété, avec des batteries plus légères. Cela est permis par l'accroissement des densités énergétiques, couplé avec une augmentation modérée des autonomies par rapport à 2016, le nombre d'infrastructures de recharge étant adapté à la demande. Cette hypothèse traduit une rupture forte sur les véhicules. Le parc de véhicules électriques équivaut à 5,5 millions en 2030 dont la moitié de VHR. C'est notamment l'intégration entre véhicules et système énergétique qui permet de s'inscrire dans une trajectoire de sortie du nucléaire et un mix 100% énergies renouvelables à 2050 grâce notamment à l'usage du V2G et au stockage des batteries en deuxième vie.

Ce scénario invite à mesurer les opportunités offertes par un renforcement de l'ambition politique.

---

6 – Source : ICCT - 2016 : [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-CO2-stds\\_2020-30\\_brief\\_nov2016.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-CO2-stds_2020-30_brief_nov2016.pdf)

### 3.5. Le scénario 3 « Renoncement politique »

Ce scénario représente les risques liés à un déploiement non maîtrisé du véhicule électrique, déconnecté de la transition énergétique, qui tout comme les politiques de soutien à la mobilité propre, s'essouffle après 2020.

Ce scénario suit une approche conservatrice de l'évolution de la mobilité électrique en France. La vision à 2030, n'inclut aucune amélioration technologique des véhicules après 2020, et repose sur une faible transformation du système énergétique. Le parc électrique

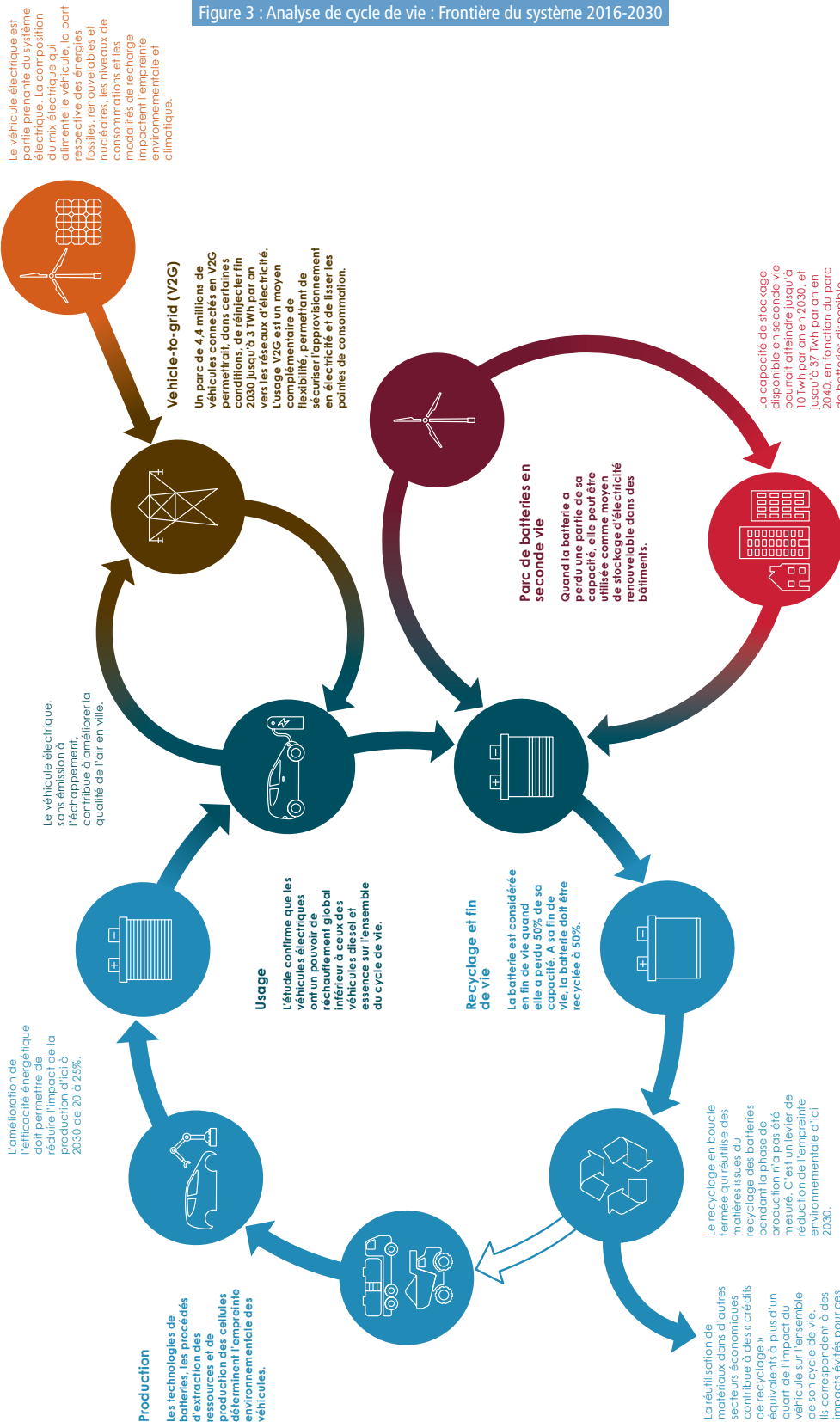
compte 1,5 millions de véhicules dont deux-tiers d'hybrides. Les consommations unitaires thermiques sont maintenues aux niveaux actuels. Les gains d'efficacité réalisés au moment de la production du véhicule et de la batterie ne sont pas réalisés. Les objectifs de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) -en particulier 29% de réduction de GES dans les transports- ne sont pas atteints et la légère baisse de production du parc nucléaire est compensée par une production électrique d'origine fossile. La réglementation sur le recyclage ne progresse pas et la réutilisation des batteries en seconde vie n'est pas optimisée. Le niveau de développement des infrastructures de recharge reste limité, et avec lui la pratique du V2G.

TABLEAU 5 : TABLEAU DES HYPOTHÈSES RETENUES DANS LES 3 SCÉNARIOS

Paramètre	Variable (unité)	Hypothèse du scénario de référence	Scénario 1 : « Ambition transition énergétique »	Scénario 2 : « Accélération en faveur des énergies renouvelables »	Scénario 3 : « Renoncement Politique »
1. Mix électrique	Part respective des différentes sources énergétiques (en %)	PPE	PPE	Vers 100% ENR	Fossile
2. Efficacité énergétique des modes de production (phase de fabrication)	Gains d'efficacité énergétique entre 2016 et 2030 = 2% (en %)	Oui	Oui	Oui	Non
3. Consommation thermique des véhicules (phase d'usage)	Évolution de la consommation unitaire (en %)	Baisse de la consommation moyenne	Baisse de la consommation moyenne	Baisse de la consommation moyenne	Maintien des niveaux de consommation actuelles
4. Évolution des batteries	Masse et capacité batteries (en Kg et en Wh)	Croissance de l'efficacité énergétique	Croissance de l'efficacité énergétique	Maîtrise de l'autonomie	Croissance de l'autonomie
5. Recyclage	Taux de recyclabilité de la batterie (en%)	50%	70%	85%	50%
6. Parc de VE-VHR	Nombre total de véhicules électriques dans le parc (en millions de véhicules)	4,4	4,4	5,5	1,5
7. Composition du parc	Part des véhicules hybrides (en %)	67%	50%	50%	67%
8. Réseaux intelligents	Taux de charge intelligente /Proportion des recharges qui sont pilotées par un optimum carbone – en % (en %)	-	40%	60%	20%
9. Infrastructures	Taux d'accès à la prise en journée (en %)	50%	50%	75%	25%
10. V2G	Taux de V2G/ Proportion des recharges qui sont bidimensionnelles et pilotées en vue d'éviter des émissions dans le système électrique (en %)	-	30%	30%	10%

# 4. FRONTIÈRE DU SYSTÈME

Le système considéré évolue entre 2016 et 2030. C'est pourquoi il est décrit ici en deux volets : l'analyse de cycle de vie 2016 et la méthode de projection à 2030.



## 4.1. Analyse de cycle de vie 2016

L'analyse de cycle de vie prend en compte les impacts de l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage des véhicules, y compris des batteries.

L'analyse de cycle de vie considère toutes les données nécessaires pour couvrir les trois étapes principales qui contribuent aux impacts environnementaux :

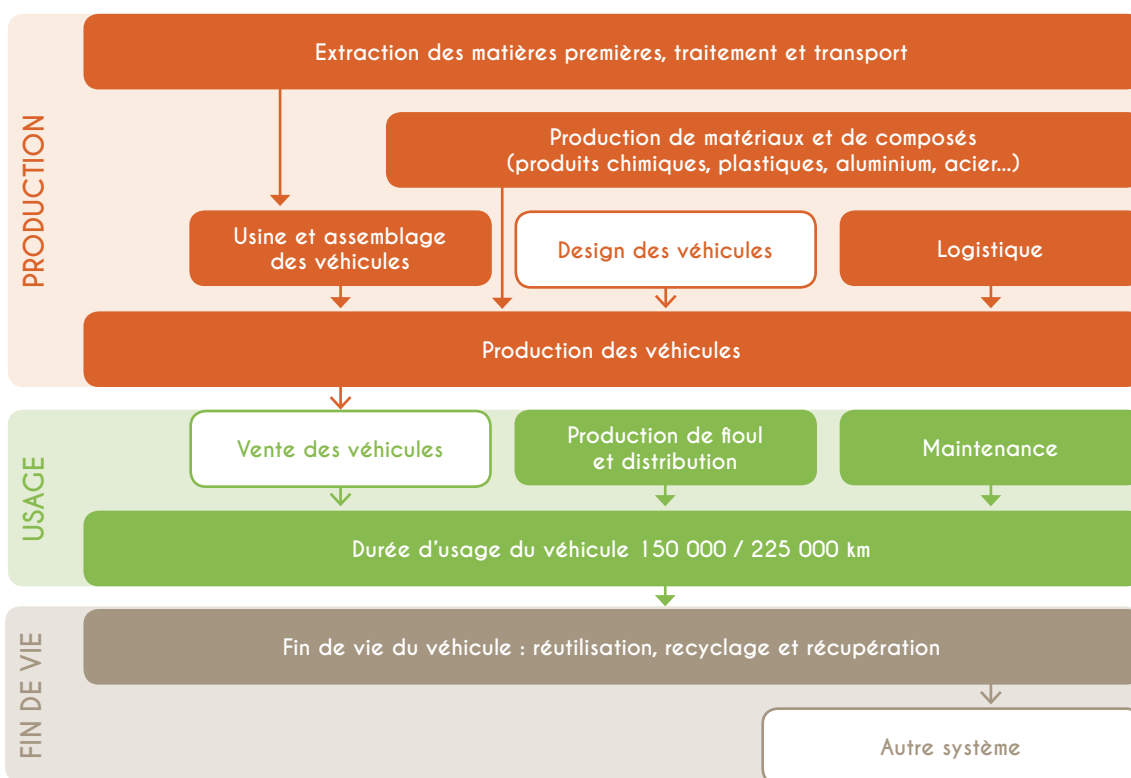
- **la production du véhicule** qui comprend l'extraction des matériaux et la production de pièces, la logistique des pièces et du véhicule;
- **l'utilisation du véhicule**, y compris la production de carburant (diesel, essence ou électricité);
- **le traitement de fin de vie** incluant le démantèlement et le déchetage.

### a) Modélisation du système

Renault a adapté sa méthode d'évaluation pour répondre aux objectifs spécifiques de cette étude. La méthodologie adoptée est décrite dans le document complémentaire «Renault LCA Methodology Report - Juillet 2017». Ce rapport et la méthodologie ont été revus dans le cadre de la revue critique de cette étude. Voir annexe 4»

La figure 4 représente les étapes et les éléments constituant le système : le périmètre inclus dans les études et celui qui est exclu, comme les avantages de la vie secondaire ou les ventes de véhicules.

Figure 4 : Périmètre de l'analyse de cycle de vie (ACV)



Source : Renault LCA Methodology Report

## b) La phase de production

La phase de production regroupe :

- **La phase d'extraction des matières premières et la production des différentes pièces.** Ces données sont basées sur des informations matérielles (base de données A2Mac1).
- **L'assemblage du véhicule**, incluant les entrées et sorties de fabrication, est simulé selon le modèle de Renault.
- **La logistique**<sup>7</sup> : les sorties logistiques, y compris la livraison de véhicules assemblés de l'usine d'assemblage au client final, sont prises en considération. Lorsque le choix est possible, la chaîne d'approvisionnement est modélisée à l'échelle européenne.

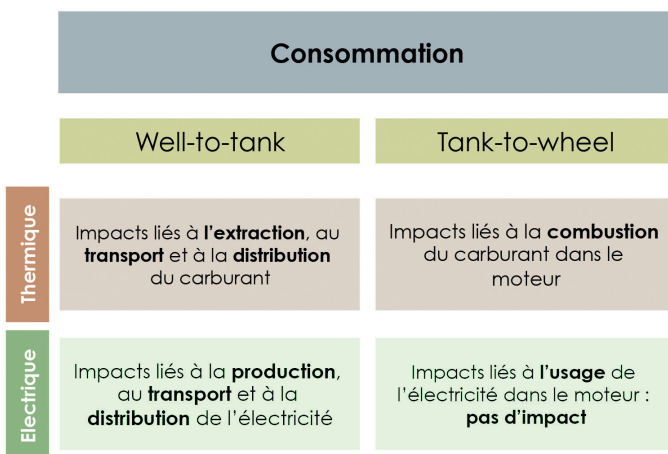
Dans le cas des études sur le véhicule électrique, la production de la batterie est traitée séparément. Les batteries sont produites en Corée et assemblées en France.

TABLEAU 6 : LIEUX DE PRODUCTION ET SOURCES DES INFORMATIONS UTILISÉES DANS L'ACV

Composant	Production	Assemblage	Source
Véhicule	France	France	Renault
Batterie	Corée	France	Renault

## c) La phase d'usage

Figure 5 : Décomposition de la phase d'usage des véhicules (hors entretien et maintenance)



7 – La construction des infrastructures, mais également celles des camions, des routes ou d'autres bâtiments est exclue de cette analyse. Quel que soit le véhicule étudié, elle serait identique et n'a pas d'intérêt dans une analyse de cycle de vie comparative. En ce qui concerne les usines, leur impact est négligeable.

## La phase d'usage inclut :

### La production de carburant et d'électricité :

- La production de carburant correspond à l'étape « Well to tank (WtT) », qui intègre la production du carburant, du combustible ou de l'électricité ainsi que son transport et sa distribution jusqu'au véhicule.
- Pour le diesel, l'essence ou l'électricité, les données thinkstep GaBi sont considérées selon le pays où le véhicule est vendu.

### La consommation de carburant et d'électricité :

La consommation de carburant correspond à l'étape «Du réservoir à la roue / Tank to Wheel (TtW)» : il s'agit, pour les carburants fossiles (essence comme diesel), des émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants lors de la combustion dans le véhicule. La consommation d'électricité en phase d'usage par le véhicule est, quant à elle, sans impact. Plusieurs études récentes ont montré les différences entre les consommations énergétiques des véhicules roulants et les niveaux d'homologation des émissions du cycle NEDC. Cette étude dépasse cette limite et prend en compte les émissions en condition réelle de conduite (cf. partie 5.4).

### La maintenance :

Huile (drain), filtres à huile (moteurs thermiques), pneus, nettoyeur de pare-brise liquide, climatisation. Les impacts liés à la maintenance des véhicules varient entre les véhicules thermiques et les véhicules électriques (cf. annexe 3).

## d) Le recyclage et le traitement en fin de vie

### Pour les véhicules

La Commission européenne a réglementé le traitement des véhicules à leur fin de vie. La directive 2000/53 / CE (par le décret n ° 2003-727) définit les règlements suivants pour le 1er janvier 2015 :

- 85% de réutilisation et de recyclage
- 95% de réutilisation, recyclage et récupération

La modélisation de la fin de vie des véhicules suit ces règlements en 2016 et en 2030.

### Pour les batteries

Le recyclage des batteries est encadré par la réglementation européenne. La Directive Batterie 2006/66/CE du 6 septembre 2006 définit les règles suivantes :

- Il est interdit de mettre en décharge une batterie usagée dans le cadre de la Responsabilité Élargie du Producteur (REP).

- Il y a obligation de collecte de 100% des batteries pour le constructeur automobile.
- Au moins 50% de la masse sèche des composants intrinsèques de la batterie doit être recyclée.

« En matière de responsabilité, les producteurs de piles et d'accumulateurs et les producteurs d'autres produits dans lesquels sont incorporés une pile ou un accumulateur sont responsables de la gestion des déchets de piles et d'accumulateurs qu'ils mettent sur le marché ». La modélisation de la fin de vie des batteries suit ces règlements en 2016 et pourra varier en 2030 (taux de recyclabilité, cf. Partie 6.4). L'effet du recyclage est pris en compte dans cette analyse en tant qu'impact évité dans d'autres filières et secteurs d'activité, tels que le bâtiment ou la chimie, et est qualifié de « crédits de recyclage ».

Les étapes du recyclage des batteries sont les suivantes :

1. **Le démantèlement**, qui a pour objectif de séparer les composants tels que les carters, les systèmes de refroidissement, les plastiques et autres pièces et composants des batteries (tel qu'indiqué dans la directive batterie 2006/66 CE).
2. **Le recyclage** des composants passifs (tels que le boîtier).
3. **Le déchetage** des composants électroniques et la séparation des métaux (avant d'être recyclés et crédités).
4. **L'incinération** des déchets polychlorobiphényles (PCB).
5. **Le recyclage des cellules**, est effectué par le biais d'un procédé pyrométallurgique (aboutit à la production d'alliage métallique, contenant des métaux de la batterie notamment) puis d'un procédé hydro métallurgique (raffinage de l'alliage métallique).

## 4.2. Etape de la projection à 2030 et extension du cycle de vie

Cette partie décrit le principe de la méthodologie appliquée pour réaliser la projection à l'horizon 2030. La description précise de cette méthodologie, la définition des variables ainsi que les valeurs attribuées aux variables sont présentées dans la partie 6 du présent rapport.

### a) ACV 2016

Les données de l'ACV 2016 servent de base pour la projection. Les impacts des différentes phases de vie des véhicules peuvent être :

- conservés constants entre 2016 et 2030 (comme c'est le cas pour la maintenance par exemple);
- modulés (par exemple au prorata de la consommation de carburant pour la phase d'usage des véhicules thermiques);
- calculés comme c'est le cas pour l'impact de la production des batteries et de la consommation d'électricité.

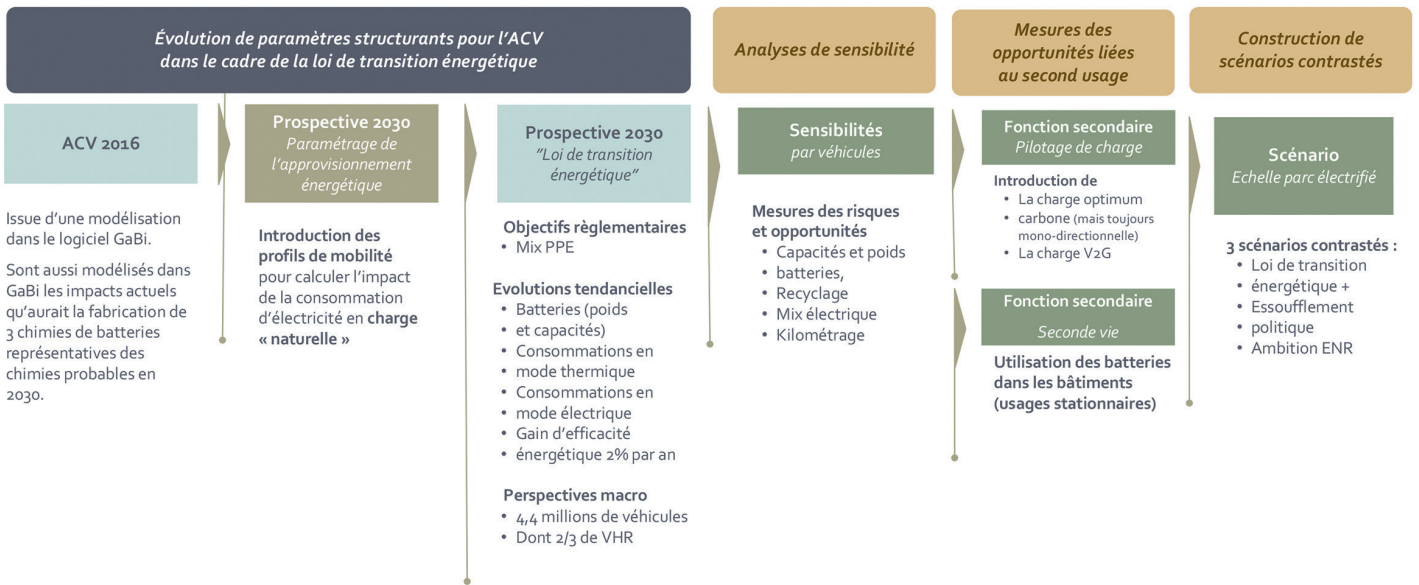
### b) Paramétrage de l'approvisionnement énergétique des véhicules électriques

L'impact environnemental de la production d'électricité pour les véhicules peut être évalué à partir d'un ratio moyen correspondant à toute la production du parc électrique français. Afin de distinguer dans l'étude la réduction d'impact que permettraient des types de charge pilotée (voire bidirectionnelle), l'impact de l'électricité a ici été calculé en tenant compte des profils horaires de chargement des véhicules (à quelle heure et à quelle puissance se rechargent-ils). Ces profils dépendent eux-mêmes d'hypothèses sur l'usage des véhicules électriques qu'il a fallu reconstituer afin de reconstituer des typologies réelles de trajets, pour différents types de journées dans l'année.

### c) Projection du scénario de référence «Loi de transition énergétique»

La projection à 2030 s'effectue dans un premier temps sur un périmètre similaire à celui de l'ACV de 2016 : il correspond à l'impact des différents véhicules pour leur unité fonctionnelle qui est la mobilité, fonction principale des véhicules. Cette projection s'effectue pour un scénario de référence qui est un ensemble cohérent d'hypothèses décrivant l'univers d'une transition énergétique telle que décrite dans la loi de transition énergétique (cf. Partie 3 de ce rapport). Ce scénario implique une évolution de plusieurs paramètres structurants comme le mix électrique (qui doit être

Figure 6 : Les différentes étapes de la prospective



conforme aux objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie], la consommation des véhicules ou encore les caractéristiques des batteries. Les impacts obtenus, à l'échelle d'un véhicule, sont ensuite cumulés pour mesurer l'impact d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques (dont 2/3 de VHR). Ces impacts sont mesurés pour cinq indicateurs environnementaux (cf. Partie 5.7).

#### d) Analyses de sensibilité

Cette première projection dans un scénario de référence est ensuite complétée par les analyses de la sensibilité des indicateurs aux paramètres les plus structurants (cf. partie 6.11). La dépendance des impacts environnementaux envers différentes variables structurantes est d'abord appréciée à travers des analyses de sensibilité qui consistent à moduler une hypothèse en particulier. Ces variations sont reflétées dans les scénarios 1, 2 et 3.

#### e) Élargissement du périmètre au second usage des batteries et à la seconde vie

La fonction secondaire des batteries pour le stockage est appréciée au regard d'un indicateur principal, à savoir le potentiel de réchauffement global.

Le périmètre de l'analyse est élargi pour estimer les impacts de la fonction secondaire des véhicules électriques. Analysé à l'échelle d'un parc, il est possible d'estimer les gains qui découlent du stockage mobile durant la première vie du véhicule, puis du stockage stationnaire durant la seconde vie de la batterie.

Le second usage en première vie peut prendre deux formes : une utilisation pilotée de la charge du véhi-

cule (charge horaire décalée afin de se charger avec le moindre impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre), et une mise en place du *vehicle-to-grid* (échanges bidirectionnels d'électricité du véhicule avec le réseau).

La seconde vie consiste à utiliser la batterie des véhicules électriques comme moyen de stockage stationnaire d'électricité dans le bâtiment, quand cette dernière a perdu 20% de sa capacité de stockage initiale. Cette fonction en deuxième vie permet également de réinjecter de l'énergie sur le réseau électrique.

#### f) La construction de scénarios contrastés

La projection est réalisée à travers trois scénarios contrastés (c'est-à-dire d'autres bouquets d'hypothèses). Pour chacun d'entre eux, les impacts sont mesurés à l'échelle des véhicules d'une part et à l'échelle d'un parc de véhicules électriques d'autre part.

Ainsi les différentes étapes de l'étude, de l'ACV à la projection de scénarios 2030, permettent d'étendre progressivement le périmètre de l'analyse des impacts environnementaux. Si l'ACV 2016 porte sur le véhicule et sa batterie, sur la fonction primaire de mobilité, la projection à 2030 intègre la fonction secondaire à savoir le stockage, et les scénarios sont calculés à l'échelle d'un parc de plusieurs millions de véhicules.

## 5. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE 2016

> Le tableau récapitulatif permettant d'apprécier la qualité des données figure en Annexe 1 de ce rapport.

### 5.1. Collecte de données : méthodes et procédures

La phase de collecte des données consiste à rassembler les informations qualitatives et quantitatives (principalement les flux de matières et d'énergie) permettant de décrire chaque processus élémentaire du cycle de vie. Les informations collectées couvrent toutes les étapes du cycle de vie : la production du véhicule (matériaux et procédés) et les phases de logistique, d'utilisation, de fin de vie.

Une modélisation dans le logiciel ACV (GaBi 6.0) permet de reproduire le cycle de vie du véhicule avec les flux de matières et d'énergie recensés.

La collecte de données pour réaliser l'ACV requiert des informations provenant de nombreuses entités, non seulement des données techniques, mais aussi des données de marketing, des rapports environnementaux ou des détails sur les matériaux et les pièces.

### 5.2. Composition des véhicules

#### a) Composition des matériaux du véhicule

Afin de garantir à l'ensemble des 8 véhicules le même traitement et le même niveau de détails, les données sont collectées sur le site A2Mac1. Les données sont extraites pour chacun des véhicules sur un format Excel regroupant l'ensemble des couples pièces/matières et les masses de chacun (ou «composition matière» des véhicules).

#### b) Etapes de traitement - production de pièces

Une fois que l'inventaire de cycle de vie est établi, la modélisation du cycle de vie est réalisée à l'aide du logiciel Gabi. Ce logiciel et les bases de données incluses permettent d'associer aux sous-étapes du cycle de vie les processus élémentaires correspondants. Les processus élémentaires sont généralement distingués en plusieurs catégories (matériaux, processus de production, de transport, d'énergie...).

Chaque processus élémentaire a lui-même fait l'objet d'un inventaire de cycle de vie, ce qui permet de couvrir l'intégralité des flux entrant et sortants du système dans ses frontières.

Le logiciel permet ensuite de calculer les impacts environnementaux potentiels à partir des données d'inventaire, en s'appuyant sur des méthodes de caractérisation des impacts.

La figure 7 ci-après décrit la méthode d'acquisition des données utilisée dans cette étude.

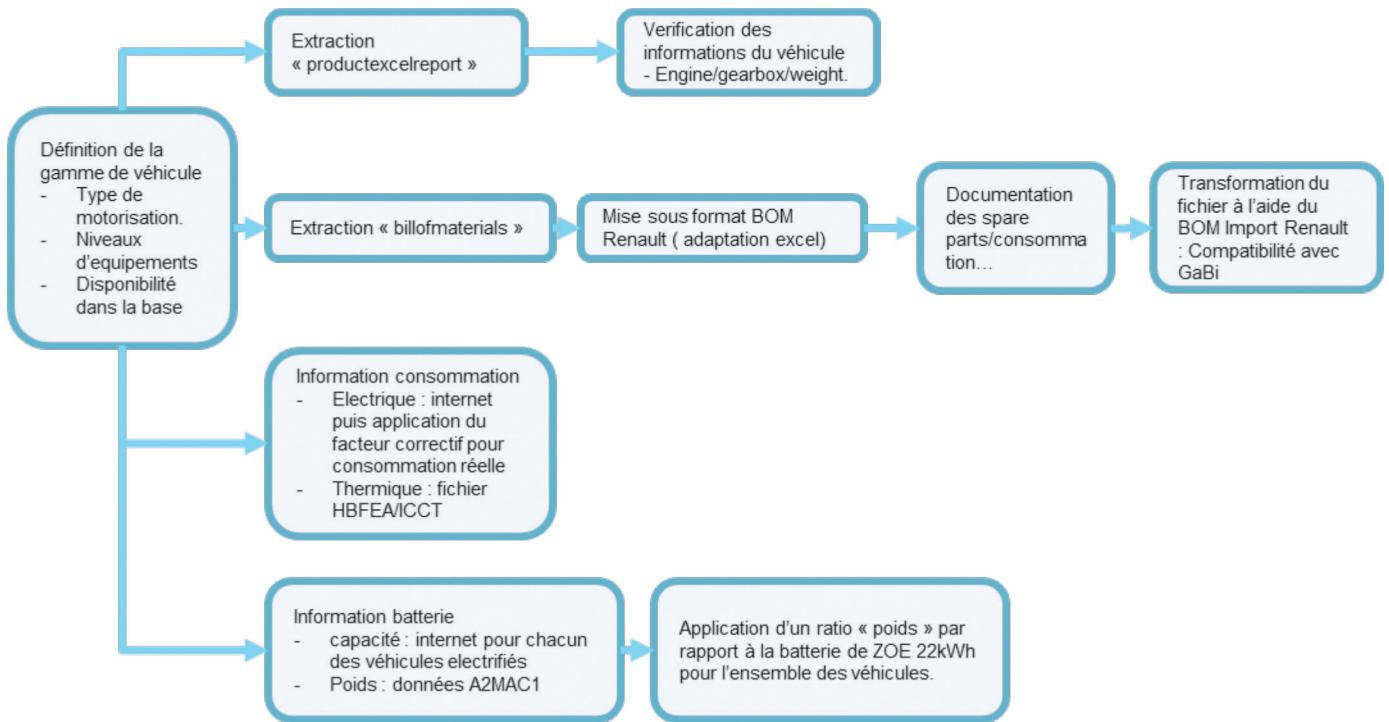
Chaque véhicule est entièrement décrit par sa «composition matière» ou «bill of materials» (fourni par l'A2Mac1 via le logiciel d'importation de nomenclature).

Pour chacune des matières présentes dans les véhicules, le processus correspondant est défini dans Gabi.

Cette association génère un «mapping», soit une liste de correspondances entre les matières recensées sur le véhicule et les matières disponibles dans les bases de données thinkstep.



Figure 7 : Méthode d'acquisition de données



### 5.3. Usines et logistique

#### a) Logistique

La logistique est divisée en périmètres entrants et sortants. L'entrée logistique est définie par toute la logistique des pièces requises pour l'assemblage des véhicules. Ces informations sont difficiles à collecter et à attribuer à un seul véhicule (modèle et usine d'assemblage dédiée). Une valeur de distance moyenne de 2000 km (par camion)<sup>8</sup> est considérée pour la logistique entrante. Cette valeur est approximativement évaluée par l'expert logistique du constructeur. Une étude de sensibilité a montré que la logistique entrante n'est pas le principal contributeur pour l'ensemble du résultat ACV du véhicule. La logistique sortante est définie par la livraison du véhicule dans le réseau de vente détail. Ces informations (nombre de kilomètres, mode de transport) sont déjà disponibles pour les ACV. Enfin, la composition matière des véhicules permet d'estimer l'impact de la chaîne d'approvisionnement totale de la production (depuis l'extraction des matières jusqu'aux étapes de traitement). L'impact des processus de transformation est proportionnel à la masse du matériau.

<sup>8</sup> – Sur la pertinence de cette distance et la mesure des impacts potentiels, voir le rapport complémentaire fourni sur l'ACV par le Groupe Renault. Y est souligné la faible contribution du transport d'approvisionnement sur les impacts environnementaux sur le cycle de vie mondial et le caractère négligeable d'une approximation sur ce paramètre.

#### b) Usines

##### Impacts

Les données sur les usines sont celles du constructeur Renault. Chaque usine participant à la production de véhicules est certifiée ISO 14001. Les données sur les consommations et les émissions sont suivies afin d'améliorer les performances environnementales. Elles concernent :

- les consommations d'énergie (électricité, thermique);
- les consommations d'eau (industrielle, domestique);
- les émissions atmosphériques (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV);
- les quantités de déchets (banals, métalliques et spéciaux).

Depuis 2012, les entreprises ont l'obligation de collecter et publier ces données (article 225 du Grenelle 2). Elles sont directement utilisées pour mener les études ACV. Ces valeurs sont disponibles dans les rapports annuels sur l'énergie et l'environnement, ils sont annoncés chaque année.

## Allocations

Pour le périmètre Usines, la question des allocations d'impacts concerne les usines de mécanique qui produisent différents types de moteurs et de boîtes de vitesse, et les usines de carrosserie-montage qui produisent différents modèles de véhicules, parfois sur une même chaîne de production.

La contribution de chaque organe mécanique et de chaque caisse devant être estimée et calculée, les consommations et émissions sont également réparties entre les véhicules assemblés dans la même usine. La même hypothèse est faite concernant le moteur et la boîte de vitesse.

## 5.4. Usage

### a) Production de carburant et d'électricité *Well to Tank (WtT)* «du puit au réservoir»

L'étape de production de carburant commence par l'extraction d'huile ou la production d'électricité et se termine par la vente au client. Les données nécessaires pour calculer cette étape sont les suivantes :

- kilométrage effectué par le véhicule pendant sa phase d'utilisation totale définie par l'unité fonctionnelle;
- type d'énergie (diesel, essence ou électricité) et sa qualité (taux de soufre, mélange de production électrique...);
- consommation du véhicule.

Les flux environnementaux associés à ces consommations (entrants ou sortants) sont inclus dans le logiciel.

### b) Utilisation de la voiture *Tank-to-Wheel (TtW)*

#### Pour les véhicules thermiques

Dans cette étude, les émissions des véhicules en 2016 ont été calculées pour correspondre à des niveaux «réels», et non à des valeurs d'homologation (cycle NEDC). Pour calculer ces niveaux d'émissions «réels», l'étude s'appuie sur les données du *Handbook Emission Factors for Road Transport*<sup>9</sup>, développé par le groupe Ermes et présidé par la Commission européenne. Les données sont construites à partir de relevés réalisés en laboratoire, sur route, avec des appareils de mesure d'émissions embarqués (PEMs) et statiques en extérieur. Ces données sont compilées

en prenant en compte des profils de roulage (types d'usage par motorisation définis par gamme de véhicule, cf. Partie 2.2).

#### Pour les véhicules électriques

Les consommations des véhicules électriques divergent en conduite réelle des valeurs d'homologation. A ce jour, il n'a pas été possible de quantifier avec exactitude la consommation électrique réelle qui dépend en outre des profils de roulage, de la température externe, de l'utilisation des options du véhicule et des modes de conduite. La consommation électrique des véhicules dans l'étude est fondée sur les valeurs d'homologation auxquelles les auteurs ont appliqué un ratio de 24% qui correspond à la différence entre les NEDC 400 km de la Zoé et l'autonomie réelle annoncée par le constructeur, à savoir plus ou moins 300 km. Ce ratio se justifie à partir des profils de roulage qui, dans le cas de la citadine 100% électrique et hybrides, favorisent les déplacements en ville. L'hypothèse intègre une part de récupération d'énergie au freinage. La logique est la même pour la part d'électrique des VHR dont le moteur électrique est plus actif en mode urbain. Pour la berline électrique, cela correspond au cycle d'homologation de l'EPA américain qui est proche des valeurs réelles d'utilisation<sup>10</sup>.

#### Pour les Véhicules VHR/VE-REX

Dans le cas où les véhicules possèdent deux modes de propulsion (VHR et VE- REX), le choix d'un ratio d'utilisation pour chacun des deux modes s'impose. Un coefficient de 1.24 a été appliqué aux consommations électriques des archétypes VHR et VE-REX en 2016 afin de refléter une consommation réelle à partir de la valeur du cycle de test NEDC.

TABLEAU 7 : RÉPARTITION DES MODES DE ROULAGE ÉLECTRIQUE - THERMIQUE POUR LES HYBRIDES EN 2016

Propulsion	Mode électrique	Mode thermique	Source
VHR	50%	50%	ICCT
VE	100%	0%	ICCT
VE-REX-	80%	20%	Consortium
Thermique	0%	100%	ICCT

9 – Cf. glossaire/ <http://www.hbefa.net/e/index.html>

10 – Cf. Annexe 1 : Qualité des données.

## 5.5. Fin de vie

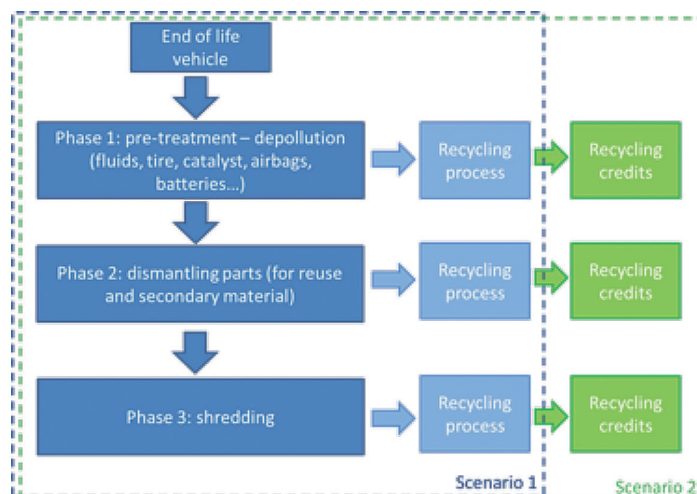
Le scénario de fin de vie est fondé sur les directives européennes (2000/53 / CE et 2005/64 / CE), qui exigent un taux de 85% de réutilisation et recyclage et 95% réutilisation et valorisation et ce depuis 2015. Le processus de recyclage suit la recommandation ISO 22628. Il prend en compte la phase de dépollution, le démantèlement des pièces et le déchetage du reste du véhicule en fin de vie.

Les processus de démantèlement et de déchetage du véhicule en fin de vie, ainsi que les processus de recyclage pour produire du matériel secondaire sont pris en compte. La figure 8 ci-dessous présente deux scénarios de recyclage, correspondant à des méthodes et des réalités différentes. L'étude s'inscrit dans le second scénario, c'est-à-dire que le matériel secondaire produit grâce aux processus de recyclage est considéré comme un substitut à de nouveaux matériaux à la production. Par conséquent, il est associé à un crédit de recyclage. Les **crédits de recyclage** sont alors estimés et inclus dans l'analyse, au niveau de la phase de recyclage.

Au cours de la phase de modélisation de la production du véhicule, l'ensemble des données utilisées pour modéliser la production de matières premières, fourni par thinkstep, peut prendre en compte des matériaux secondaires (par exemple, la production d'acier tient compte de l'intégration de matériaux secondaires). Les quantités de matériaux secondaires pris en compte en entrée du système lors de la phase de fabrication ne sont pas comptabilisées dans les impacts évités liés au recyclage afin de prévenir un double comptage de ce bénéfice.

Pour la batterie, les matières qui sont recyclées sont celles pour lesquelles une filière de recyclage existe. Aujourd'hui, la majorité des métaux sont recyclés, dont l'aluminium, le cuivre et l'acier, le cobalt, le manganèse, le lithium et le nickel. Ils font partie des 50% obligatoires pour atteindre les 50% de recyclage de la masse nette. La fonte ou encore les plastiques sont également recyclés, ainsi que les fluides qui sont extraits avant recyclage pour la dépollution. Les 15% non recyclés sont brûlés tels que les mousses et les textiles. Il faut compter qu'environ 5% de masses lourdes de type PVC ne sont pas recyclés.

Figure 8 : Modélisation du recyclage



## 5.6. Catégories d'impact considérés

L'analyse de cycle de vie repose sur 5 indicateurs, couramment utilisés dans l'industrie automobile, qui ont été jugés pertinents dans le cadre de l'étude pour répondre à ses objectifs.

### a) Les 5 indicateurs

Les indicateurs environnementaux ont été choisis en considérant trois critères :

- contributions connues et supposées du produit automobile,
- diversité des écosystèmes, biodiversité locale, épuisement des ressources mondiales,
- indicateurs considérés comme importants par les experts de l'environnement et l'industrie automobile européenne.

La matrice française proposée par l'ADEME<sup>11</sup> propose les critères de sélection suivant :

TABLEAU 8 : MATRICE DE SÉLECTION DES INDICATEURS D'IMPACTS					
Impact Assessment Proposals		Évaluation			
		RELEVANCE	FEASIBILITY	CONSISTENCY	FIABILITY
Global warming	✓	high	high	high	high
Abiotic depletion	✓	high	high	high	high
Water eutrophication	✓	medium	medium	medium	medium
Photochemical pollution	✓	medium	medium	medium	medium
Acidification	✓	medium	medium	medium	medium
Aquatic ecotoxicity	✗	medium	low	medium	low
Biodiversity	✗	low	low	medium	low
Land Use Change	✗	low	low	medium	low

**Épuisement des ressources fossiles (Abiotic depletion) :** cet indicateur exprime la quantité totale d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel...) consommée sur tout le cycle de vie des véhicules. L'indicateur est calculé en MJ.

**Potentiel de réchauffement global (Global Warming Potential) :** cet indicateur mesure la contribution des gaz à effet de serre, comme le CO<sub>2</sub>, mais également le méthane (CH<sub>4</sub>), émis dans l'atmosphère au réchauffement climatique. Il est mesuré en kg CO<sub>2</sub>-eq.

**Potentiel d'acidification :** l'acidification est causée par le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le monoxyde d'azote, le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), ou encore l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) résultant de la combustion des carburants fossiles ou de la production d'électricité. L'acidification se définit comme la perte de nutriments tels que le calcium, le magnésium ou le potassium, et leur remplacement par des éléments acides. Elle perturbe les milieux naturels, les sols, l'eau, la flore et la faune, et est à l'origine des pluies acides. Le potentiel d'acidification est calculé en kg SO<sub>2</sub>-eq. L'échelle d'appréciation de cet indicateur est l'échelle locale et régionale (européenne ou asiatique par exemple).

**Potentiel d'eutrophisation aquatique :** l'eutrophisation est la conséquence d'un apport excessif de nutriments d'origine anthropique, le plus souvent introduits sous la forme de produits phosphatés ou azotés. Ces substances encouragent la croissance rapide d'algues qui mettent en danger la biodiversité du milieu en privant le reste des organismes végétaux de CO<sub>2</sub> et de lumière. L'unité retenue est le kilogramme équivalent phosphate (kg PO<sub>4</sub>-eq). Comme l'acidification, l'eutrophisation est évaluée à l'échelle des grandes régions.

**Potentiel de création d'ozone photochimique :** cet indicateur représente la transformation, sous l'influence du rayonnement solaire, de polluants atmosphériques (monoxyde de carbone (CO), dioxyde de soufre, monoxyde et dioxyde d'azote et d'ammoniac) en ozone et autres composés oxydants. Cet indicateur est exprimé en kg Ethene équivalent (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq.) L'ozone troposphérique peut impacter la santé humaine : irritation des voies respiratoires et des yeux, baisse des performances physiques et détérioration de la fonction pulmonaire.

## b) Interprétation et normalisation des résultats

Les impacts mesurés dans les analyses de cycle de vie sont exprimés dans différentes unités qui permettent de quantifier des effets physiques sur un environnement donné. Par exemple, le potentiel de réchauffement planétaire est mesuré en CO<sub>2</sub>-eq. et le potentiel d'acidification en SO<sub>2</sub>-eq. Pour faciliter la compréhension des résultats obtenus, des valeurs de normalisation peuvent être utilisées, pour donner une estimation de l'impact environnemental annuel d'un Européen moyen.

L'indicateur de normalisation utilisé dans le cadre de cette étude reprend la méthodologie développée par le Joint Research Center (JRC)<sup>12</sup>. Les valeurs de référence utilisées sont celles recommandées pour l'Europe des 27 et relatives à l'inventaire de 2010 (2013b.) pour une population de 499 millions d'habitants (CML2001 - Apr. 2013, Western Europe).

Les valeurs sont utilisées à titre indicatif, afin de faciliter la compréhension de l'indicateur. Elles sont à utiliser avec précaution, au regard des méthodolo-

11 – ADEME, "Environmental communication on mass market products" – Part 0: General principles and methodological framework, 2011.

12 – Joint Research Center, Commission's science and knowledge service <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC91531/lb-na-26842-en-n.pdf>

gies pour le calcul effectué pour obtenir la valeur de normalisation et celui de l'ACV. Elles indiquent par ailleurs une importance relative de l'impact d'un produit, ici le véhicule, par rapport à un impact global

ramené à l'échelle d'un habitant. Ces valeurs ne précisent pas l'importance que peut avoir cet impact sur l'environnement ou la santé humaine.

A titre de comparaison, les valeurs de normalisation d'un habitant européen moyen sont présentées dans le tableau 9 ci-dessous :

TABLEAU 9 : VALEURS DE NORMALISATION POUR LES 5 INDICATEURS DE L'ÉTUDE ACV				
	EU des 27 pour 499 millions d'habitants en 2013	Valeurs de normalisation par habitant / an	Unité	Robustesse de l'hypothèse
Depletion abiotique	3,06 E+13	61 000	MJ	Moyenne
Contribution au réchauffement climatique (GWP)	4,88 E+12	9 800	kg CO <sub>2</sub> -eq.	Très élevée.
Potentiel d'acidification (AP)	2,73 E+10	55	kg SO <sub>2</sub> -eq.	Elevée
Potentiel d'eutrophisation	1,28 E+10	26	kg PO <sub>4</sub> -eq.	Moyenne à faible
Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP)	8,24 E+9	17	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.	Moyenne

- La consommation annuelle de ressources fossiles d'un Européen moyen est de 61 000 MJ.
- climat annuelle d'un européen moyen est de 9,8 t CO<sub>2</sub>-eq. en Europe.
- Le potentiel d'acidification, ramené à l'échelle d'un habitant en Europe, est estimé à 55kg SO<sub>2</sub> -eq.
- Le potentiel d'eutrophisation, ramené à l'échelle d'un habitant en Europe et sur une durée d'un an, est estimé à 26 kg PO<sub>4</sub>-eq.
- Le potentiel de création d'ozone photochimique en Europe est estimé à 17 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq. par habitant et par an.

Le groupe d'experts a choisi de particulièrement développer l'interprétation des résultats sur les indicateurs de changement climatique et d'acidification. Ce choix s'explique par l'importance de ces deux phénomènes sur les écosystèmes et l'interdépendance qu'ils entretiennent avec les modèles de mobilité scénarisés dans cette étude.

### c) Limites / indicateurs non considérés

#### Les ressources minérales

L'étude n'a pas évalué la consommation de ressources minérales. Pourtant certains matériaux contenus dans les batteries font l'objet d'une certaine criticité, comme le cobalt par exemple<sup>13</sup>, et les conditions d'extraction, et d'exploitation ne garantissent pas toujours ni la protection de l'environnement, ni le respect des droits humains. Il ressort des échanges entre les parties prenantes de cette étude que l'indicateur existant pour la consommation de ressources minérales n'était pas adapté, et que l'ACV n'est pas le meilleur moyen d'analyser cette problématique. La disponibilité, la criticité et le coût des matières premières, ainsi que le contexte géopolitique et la responsabilité des entreprises mériteraient un examen approfondi, qui dépasse le périmètre de cette étude.

#### Déchets

La production de déchets sur les grandes étapes de la production du véhicule (chaîne d'assemblage, production du moteur et de la boîte de vitesses) est prise en compte dans l'ACV, de manière directe, à partir des données du constructeur automobile. Pour les déchets générés tout au long de la chaîne d'approvisionnement (implication dans une approche ISO 14001 ou utilisation d'un outil indicateur éco), pour les procédés et extraction de matières premières, y compris les déchets liés à la production d'électricité nucléaire par exemple, les quantités prises en compte dans l'ACV proviennent des bases de données du logiciel GaBi.

13 – La criticité d'une substance minérale s'apprécie selon les risques d'approvisionnement et selon l'impact économique. Le cobalt est évalué en 2015 par le BRGM à un niveau de criticité moyen, [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches\\_criticite/fichecriticitecobalt-publique150828\\_0.pdf](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticitecobalt-publique150828_0.pdf)

### Les émissions de particules

Un indicateur à part entière sur la toxicité humaine (mesurant les agents cancérigènes et la pollution atmosphérique provenant principalement des matières particulaires émises par les véhicules pendant la phase d'usage au niveau local), n'a pas été sélectionné dans cette étude. Ce choix méthodologique est une limite de l'étude.

Des données concernant les bénéfices des véhicules électriques pour la qualité de l'air en France sont disponibles dans l'étude «*En route pour un transport durable*», publiée en 2015. Selon cette étude, «*la transition vers des technologies bas-carbone pour les véhicules telles que décrites dans cette étude réduirait les émissions de NOx par 72% en 2030 et par 86% en 2050. En clair, la décarbonation aurait des effets bénéfiques pour réduire efficacement les émissions directes de NOx du pot d'échappement des véhicules*»<sup>14</sup>.

Au regard de la littérature existante, la plus-value de cet indicateur au sein de cette étude, a été jugée faible par les auteurs. Par ailleurs, l'outil d'ACV comparatif et prospectif permet d'avoir une mesure précise des consommations d'énergies fossiles et des émissions de gaz à effet de serre, mais ne permet pas de mesurer la qualité de l'air au niveau local. En effet, ce phénomène nécessite une analyse territorialisée, et en situation de «conduite réelle». C'est pourquoi

l'ACV comparative n'a donc pas été retenue comme le moyen le plus pertinent d'analyser l'impact de l'évolution des motorisations sur la qualité de l'air en France en 2016 et en 2030.

Ces limites n'affectent pas directement la capacité à répondre aux objectifs de l'étude, qui porte en premier lieu sur l'analyse des impacts de trajectoire de développement du véhicule électrique dans le cadre de la transition énergétique.

### Autres émissions

Dans cette étude comparative, les émissions particulaires hors gaz d'échappements n'ont pas été prises en compte. Par exemple, le facteur d'émission d'abrasion des pneus est réputé être identique pour tous les véhicules et n'a pas été intégré à l'analyse par manque de données fiables. En effet, la composition de ces particules d'usure dépend beaucoup du fournisseur. Par exemple, ces émissions particulaires peuvent varier de manière importante en fonction du type de pneus montés sur le véhicule au cours de sa durée de vie. De plus, le remplacement de ce type de pièces est effectué sans contrôle par le fabricant. La composition des particules est également très dépendante de la technologie.

14 – cf. <https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2016/10/En-route-pour-un-transport-durable-summaire.pdf> page 12.

## 6. MODÉLISATION PROSPECTIVE 2030

### 6.1. Description de la modélisation

La modélisation prospective a pour but d'évaluer l'impact des véhicules en 2030. Réalisée à partir de l'ACV 2016, elle identifie d'une part les évolutions de variables structurantes telles que la consommation des véhicules, le mix électrique, les caractéristiques des batteries, et d'autre part les bénéfices environnementaux potentiels de la fonction secondaire des batteries des véhicules électriques.

Les différentes parties qui suivent présentent la méthodologie utilisée pour réaliser ces évolutions, ainsi que les hypothèses de modélisation. L'approche par «scénarios contrastés» permet de dépasser les incertitudes qui sont liées à l'exercice de projection.

#### Recueil des données

Les hypothèses 2030 pour les scénarios (Partie 6), ont été définies par le comité de pilotage.

Les données sont issues de la réglementation en vigueur (comme c'est le cas pour le recyclage), de la littérature existante ou des ajouts des experts ayant participé aux comités de pilotage et dont l'expérience en matière d'ACV et de transport est reconnue.

### 6.2. Impacts de la fabrication du véhicule en dehors de sa batterie

#### a) Les gains d'efficacité énergétique

Pour cette phase du cycle de vie, l'hypothèse principale retenue dans cette étude est un gain de 2% d'efficacité énergétique par an, soit 25% d'ici 2030. Cette hypothèse ambitieuse, qui s'applique à l'ensemble des indicateurs environnementaux, est notamment fondée sur les gains constatés ces 10 dernières années dans le secteur de la production automobile et de l'extraction (source constructeur), obtenus grâce à l'amélioration des procédés de fabrication. Ces gains interviennent notamment soit en augmentant la part de matériaux recyclés, en utilisant des matériaux à moindre impact, soit par une réduction de l'empreinte environnementale de l'énergie nécessaire pour l'extraction des matières premières, pour leur transformation et pour l'assemblage des pièces.

Pour les besoins des scénarios, une hypothèse alternative est introduite, qui correspondrait à un échec des politiques énergétiques : dans ce cas, aucun gain supplémentaire n'est réalisé en termes d'impact environnemental sur la phase de fabrication des véhicules.

TABLEAU 10 : HYPOTHÈSES 2030 SUR LES GAINS D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA PRODUCTION DES VÉHICULES ENTRE 2016 ET 2030

Hypothèse 1	2% de baisse par an, soit une réduction de 25 % entre 2016 et 2030
Hypothèse 2	0%, stagnation

#### b) L'évolution de la composition matière des véhicules

Ce critère n'a pas été pris en compte dans l'étude. La masse totale des différents véhicules n'évolue donc pas entre 2016 et 2030. Les experts proposent de considérer que l'allègement potentiel des véhicules peut être compensé par l'évolution des équipements embarqués.

**Remarque complémentaire :** la berline électrique sélectionnée pour l'analyse en 2016 est principalement composée d'aluminium alors que les autres véhicules de la gamme sont faits majoritairement d'acier. Ce choix reflète la structure actuelle du marché des berlines électriques. Néanmoins, la production d'aluminium émet aujourd'hui deux fois plus de CO<sub>2</sub> que celle de l'acier. Cette hypothèse contribue dans une large mesure aux niveaux d'émissions de la phase de production du véhicule. Sur la base des annonces des constructeurs automobiles concernant les modèles de véhicules électriques à venir, il est important de reconnaître qu'il est possible que le segment des berlines en 2030 soit dominé par des modèles composés de plus d'acier et de moins d'aluminium. Cela aura pour conséquence de réduire l'impact des émissions liées à la production du véhicule en tant que tel.

## 6.3. Batteries

### a) Trois hypothèses d'évolution contrastées des batteries

Les densités énergétiques des batteries prises en compte dans l'étude augmentent entre 2016 et 2030, de manière identique pour les trois hypothèses considérées, et en cohérence avec les limites étudiées par le Centre d'Énergie Atomique (CEA) et les constructeurs<sup>15</sup>. Par ailleurs, les variables déterminantes de l'impact de la fabrication des batteries en 2030 sont les masses des batteries et l'impact de chaque kg de batterie. Trois jeux d'hypothèses ont été définis.

**Hypothèse 1 :** Croissance de l'efficacité énergétique : les batteries gagnent en efficacité énergétique, pour devenir plus performantes (une plus grande capacité, autonomie). La recherche de l'équilibre autonomie / prix favorise la maîtrise de la croissance de la masse des packs batterie. Cette hypothèse est considérée comme plausible au vu des progrès actuels observés et est utilisée dans le scénario de référence illustrant la loi de transition énergétique.

**Hypothèse 2 :** Croissance des capacités : l'augmentation des capacités des batteries est justifiée par une densité d'infrastructures de recharges plus faible. Les capacités de batteries sont néanmoins supérieures au niveau de 2016.

**Hypothèse 3 :** Maîtrise des capacités : cette hypothèse prend en compte d'ici 2030 l'arrivée de batteries avec des capacités modérées. Les capacités restent néanmoins supérieures aux niveaux de 2016. Cette évolution s'inscrit dans un contexte de développement important des infrastructures de recharge et donc d'un besoin en autonomie moins important pour les véhicules. Il s'agit d'une hypothèse de rupture, qui suggère une diminution de la puissance des véhicules (qui n'est pas introduite ici). Cette hypothèse est cohérente avec un scénario Accélération en faveur des énergies renouvelables, où la sobriété joue un rôle déterminant, et qui peut, de manière cohérente, intégrer une évolution des usages de mobilité.

TABLEAU 11 : HYPOTHÈSES SUR L'ÉVOLUTION DES BATTERIES EN 2030\*

	Unités	Citadines				Berlines			
		VT/	VHR	VE -REX	VE	VT	VHR	VE	VHR SUV- 4X4
Masse de la batterie 2016	Kg		120	230	290		180	600	270
Consommation électrique 2016 **	kWh/100 km		14.1	16.7	12.7		16.6		20.8
Consommation électrique 2030	kWh/100 km		13.5	13.5	12.65		16.0	19.9	20.8
Densité énergétique de la batterie en 2030	Wh/kg	80	160	160	160	80	220	230	220
HYP 1 2030 : Efficacité	Masse kg	19	106	219	313	38	109	391	123
	Capacité kWh	1.5	17	35	50	3.0	24	90	27
HYP 2 : Autonomie	Masse kg	19	188	375	375	38	182	522	205
	Capacité kWh	1.5	30	60	60	3.0	40	120	45
HYP 3 – 50% de réduction sur VE-REX et VHR berlines et 25% sur berline VE	Masse kg	19	94	188	188	38	91	326	114
	Capacité kWh	1.5	15	30	30	3.0	20	75	25

\*LES HYPOTHÈSES PRISES POUR LES FUTURES TAILLES DES BATTERIES NE SONT PAS BASÉES SUR DES PLANS DÉFINIS PAR DES CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES, MAIS PLUTÔT DES EXTRAPOLATIONS AU VU DE TENDANCES OBSERVÉES. CERTAINS CHOIX NE SONT PEUT-ÊTRE PAS RÉALISABLES (DU POINT DE VUE TECHNIQUE OU COMMERCIAL, PAR EXEMPLE UNE CITADINE VHR AVEC UN PACK DE 30KWH) MAIS L'OBJECTIF DES SCENARIOS EST DE CAPTURER PLUSIEURS CAS DE FIGURE. ?

\*\* LES CONSOMMATIONS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES DIVERGENT EN CONDUITE RÉELLE DES VALEURS D'HOMOLOGATION. A CE JOUR, IL N'A PAS ÉTÉ POSSIBLE DE QUANTIFIER AVEC EXACTITUDE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE RÉELLE QUI DÉPEND EN AUTRES DES PROFILS DE ROULAGE, DE LA TEMPÉRATURE EXTERNE, DE L'UTILISATION DES OPTIONS DU VÉHICULE ET DES MODES DE CONDUITE. LES AUTEURS DE L'ÉTUDE ONT APPLIQUÉ UNE CORRECTION À LA HAUSSE DE 24% SUR LES CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES RECHARGEABLES HOMOLOGUÉS AFIN DE CORRIGER EN PARTIE CETTE DIFFÉRENCE. LES PROFILS DE ROULAGE DÉVELOPPÉS IMPLIQUENT, SUR LE SEGMENT DES CITADINES, UNE CONDUITE EN VILLE DE L'ORDRE DE 41%, AVEC NOTAMMENT UNE RÉCUPÉRATION SUBSTANTIELLE D'ÉNERGIE AU ROULAGE. CE FACTEUR EST FONDÉ SUR L'AJUSTEMENT COMMUNIQUÉ PAR LE CONSTRUCTEUR RENAULT POUR SON MODÈLE ZOÉ. LA CONSOMMATION DE LA BERLINE ÉLECTRIQUE EST QUANT À ELLE BASÉE SUR LES DONNÉES DE L'EPA AMÉRICAINE DONT LES MESURES SE RAPPROCHENT DES VALEURS RÉELLES DE CONSOMMATION.»

► LES CONSOMMATIONS INDIQUÉES POUR LES VHR S'APPLIQUENT AU MODE DE CONDUITE ÉLECTRIQUE.

15 – PERDU F., « Batteries: energy and matter issues for renewables and electric mobility », CEA, Paris, 2016.



## b) Composition matière

Si une même chimie de batterie est conservée entre les différents véhicules, le ratio de masse des matières premières NMC (nickel-manganèse-cobalt) évolue dans des proportions variables en fonction des types de véhicules. La variante de chimie 1 est attribuée aux véhicules mild-hybrid, la variante de chimie 2 aux citadines VE, VHR et VE-REX et la variante de chimie 3 aux berlines VE et VHR. Les données précises concernant la chimie lithium-ion et ses variantes sont confidentielles et non restituées dans cette étude.

## c) Valeurs d'impact par kg

L'impact de la fabrication des batteries est calculé directement en analyse de cycle de vie dans le logiciel GaBi, sur la base des données constructeurs. Cet impact est ensuite ramené à l'unité de masse des batteries électriques, toujours en distinguant les trois variantes de chimie. Cet impact au kg de batterie est utilisé dans le calcul des impacts des batteries 2030, en fonction des hypothèses de masse qui sont faites.

TABLEAU 12 : VALEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES BATTERIES 2030

	Citadines				Berlines		
	Mild hybrid	VHR	VE-REX	VE	Mild hybrid	VHR	VE
Ratio chimie (base NMC)	N° 1	N°2	N°2	N°2	N°1	N°3	N°3
Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	140	155	155	155	140	144	144
Acidification Potential (AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	0,124	0,171	0,171	0,171	0,124	0,146	0,146
Eutrophication Potential (EP) [kg P <sub>04</sub> -eq.]	0,0182	0,0114	0,0114	0,0114	0,0182	0,0107	0,0107
Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	13,2	14,7	14,7	14,7	13,2	13,4	13,4
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq -eq.]	0,007	0,009	0,009	0,009	0,007	0,008	0,008

## d) Gains d'efficacité énergétique à la production

Les hypothèses de gains d'efficacité énergétique pour la fabrication des batteries des véhicules sont identiques à celles appliquées à la fabrication des véhicules (hors batteries). C'est-à-dire, soit un gain d'efficacité énergétique annuel de 2% par an pris en compte dans le calcul d'impact environnemental, soit l'absence de gain.

parcourus durant la durée de vie des véhicules. L'application de cette méthodologie revient à considérer que l'impact pour la consommation de chaque litre de carburant reste inchangé, quel que soit l'indicateur environnemental. C'est-à-dire que le contenu carbone des produits pétroliers reste inchangé.

Pour les véhicules hybrides rechargeables et équipés d'un prolongateur d'autonomie, il faut tenir compte de l'hypothèse sur la répartition des kilomètres parcourus entre mode thermique et mode électrique. Si par exemple pour les véhicules hybrides rechargeables la proportion du fonctionnement de la motorisation thermique passe de 50% à 25% des kilomètres parcourus, cela revient à considérer que le nombre de kilomètres réalisés en motorisation thermique baisse de moitié.

Dans les hypothèses, la fraction des kilomètres parcourus en mode électrique évolue sensiblement, notamment pour les VHR pour lesquels elle passe de 50% en 2016 à 75% en 2030. Pour le VE-REX elle évolue de 80% à 85%. Ces évolutions se fondent sur le fait que le réseau d'infrastructures de recharge en 2030 sera plus étendu que le réseau actuel d'une part, et que les autonomies des véhicules seront plus élevées d'autre part. Enfin, les possesseurs de VHR seront possiblement plus sensibles aux avantages économiques de la conduite en mode électrique, cherchant ainsi à maximiser la proportion des kilomètres ainsi parcourus.

## 6.4. Impacts de l'usage du véhicule

### a) Paramétrage de la phase d'usage

La phase d'usage est d'abord décomposée en sous-phases, dans la continuité de l'analyse de cycle de vie. L'étude n'intègre pas les impacts environnementaux liés aux évolutions pour la **maintenance** des véhicules, ainsi les impacts de cette sous-phase restent inchangés entre 2016 et 2030.

Pour les impacts liés à la **consommation des véhicules VHR en mode thermique** : que ce soit en *well-to-tank* ou en *tank-to-wheel*, ils varient au prorata de la consommation kilométrique et des kilomètres

TABLEAU 13 : RÉPARTITION DES MODES DE ROULAGE ÉLECTRIQUE - THERMIQUE POUR LES VÉHICULES EN 2030

Propulsion	Mode électrique	Mode thermique	Source
VHR	75%	25%	ICCT
VE	100%	0%	ICCT
VE-REX	85%	15%	Consortium
Mild hybrid	0%	100%	ICCT

Pour les impacts liés à la **consommation des véhicules en mode électrique**, l'évolution de l'impact se fait également au prorata de la consommation kilométrique (mesurée en kWh par 100 km) et au prorata des kilomètres parcourus durant la durée de vie. Cette évolution tient compte de la fraction des kilomètres réalisée en mode électrique, donc pour les VHR en augmentation de 50% entre 2016 et 2030.

Contrairement aux impacts environnementaux d'un litre de carburant consommé, l'impact de l'électricité consommée par les véhicules électriques est calculé en tenant compte de l'évolution de l'impact de chaque kWh. Pour cela, il faut intégrer l'évolution du mix électrique, mais aussi des hypothèses sur les caractéristiques des charges qui sont présentées dans le chapitre 6.

## b) Émissions de polluants

Les émissions de polluants atmosphériques tels que les particules fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) ne figurent pas dans les indicateurs de cette ACV. Le sujet de la pollution de l'air a fait l'objet d'une analyse dans le cadre de l'étude «En route pour un transport durable» en 2015.

## c) La consommation des véhicules (thermiques et électriques)

### Réglementation et tendances actuelles

En 2009, l'Union Européenne a instauré des normes contraignantes pour les émissions des voitures neuves à hauteur de 130g de CO<sub>2</sub> par km (soit environ 5,2l/100 km) en 2015 et 95g de CO<sub>2</sub> par km (de l'ordre de 3,7l/100 km) en 2020 en cycle NEDC, sur la moyenne de l'ensemble des nouvelles ventes pour chaque constructeur automobile.

En 2013 en France, la consommation moyenne des véhicules était de 5,5 l/100km sur cycle NEDC. Plus

de 40% des véhicules particuliers en France ont aujourd'hui un niveau d'émission inférieur à 120g/km sur cycle NEDC. Le règlement de 2009 impose la révision « des modalités de mise en œuvre de l'objectif de long terme de 95g CO<sub>2</sub>/km d'ici à 2020 ». Cet objectif a été confirmé lors de la publication de la « Stratégie européenne pour la mobilité bas-carbone », publiée le 20 juillet 2016. Elle indique une volonté claire de poursuivre les efforts d'efficacité énergétique des véhicules pour diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble du parc automobile, sans indiquer à ce stade de niveaux d'émissions précis pour atteindre cet objectif. De nouvelles normes devraient entrer en vigueur à partir de 2021, définies dans le Paquet transport de la Commission européenne en novembre 2017.

### Hypothèses 2030 sur la consommation des véhicules thermiques et électriques

La stratégie de développement de la mobilité propre intègre une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules d'ici à 2030. Les hypothèses retenues concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules s'inscrivent dans la continuité des scénarios élaborés par Cambridge Econometrics dans le cadre des études « Fuelling Europe's Future » (FEF) et « En route pour un transport durable ». Une mise à jour des taux d'amélioration annuels pour les nouveaux véhicules d'ici à 2030 est tirée des travaux du ICCT<sup>16</sup>.

Les véhicules thermiques en 2030 possèdent une hybridation légère qui leur permet de réduire leur consommation à l'usage. Pour les VHR et le VE-REX, les consommations indiquées dans le tableau 14 sont celles rapportées aux modes de roulage correspondant. Pour la citadine VHR par exemple la consommation de 31 / 100 km se réfère à la consommation de carburants sur la fraction des kilomètres effectuée en mode thermique (25% en 2030).

La consommation des véhicules électriques diminue légèrement entre 2015 et 2030 : 4% de réduction pour la citadine et la berline VHR, 6% de baisse pour la berline VE, presque pas d'évolution pour la citadine VE qui part déjà d'un niveau faible en 2016, et enfin une baisse de 20% pour le VE-REX. Ces hypothèses s'appuient sur les travaux du service scientifique de la Commission européenne (Joint Research Center<sup>17</sup>) et ont été validées par les membres du groupe d'experts (voir ci-dessous concernant le taux de rendement-perdes).

16 – ICCT "2020-2030 CO<sub>2</sub> Standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union", Briefing November 2016

17 – Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, JRC – 2014.

TABLEAU 14 : SYNTHÈSE DES CONSOMMATIONS DES VÉHICULES (VALEURS EN CONDITIONS RÉELLES D'UTILISATION)

	Unité	Citadine Mild-hybrid	Citadine VHR	Citadine VE-REX	Citadine VE	Berline Mild-hybrid	Berline - VHR	SUV-4X4 VHR	Berline VE
Consommation thermique 2016	l / 100 km	6,5	4,3	7,5	-	5,8	6,5	9,8	-
Consommation thermique 2030	l / 100 km	3,8	3,0	3,5	-	3,9	3,8	5,7	-
Consommation électrique 2016*	kWh / 100km	-	14,1	16,7	12,7	-	16,6	20,8	21,1
Consommation électrique 2030*	kWh / 100 km	-	13,5	13,5	12,6	-	16	20,8	19,9

\* CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES : CF. REMARQUE TABLEAU 11.

► POUR LE SUV 4X4 DE LA GAMME BERLINE, L'HYPOTHÈSE EN 2030 NE PREND EN COMPTE AUCUNE ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE PAR RAPPORT À 2016. EN EFFET, CE TYPE DE VÉHICULE APPARTIENT À UN SEGMENT DE NICHE SUR LE MARCHÉ DE L'AUTOMOBILE. AINSI LE GROUPE D'EXPERTS DE L'ÉTUDE A CONSIDÉRÉ QUE LES INVESTISSEMENTS RÉALISÉS SUR CE TYPE DE VÉHICULE D'ICI À 2030 NE PERMETTRONT PAS DE RÉALISER DES GAINS SUR LES NIVEAUX DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE SUFFISAMMENT IMPORTANTS POUR JUSTIFIER UNE BAISSÉ REPRÉSENTATIVE DE LA CONSOMMATION DE L'ENSEMBLE DE CE SEGMENT DE MARCHÉ EN 2030.

## 6.5. Caractéristiques des charges

L'impact environnemental de la production d'électricité pour les véhicules peut être évalué à partir d'un ratio moyen correspondant à toute la production du parc électrique français. Afin de distinguer dans l'étude la réduction d'impact que peuvent permettre des types de charge pilotée (voire bidirectionnelle), l'impact de l'électricité a été calculé en tenant compte des profils horaires de chargement des véhicules (à quelle heure se rechargent-ils, et à quelle puissance), ainsi que de différentes modalités de recharge :

- les puissances de charge : charge normale (7 kW), accélérée (22 kW), ou ultra-rapide (150 kW);
- la charge naturelle ou la charge pilotée, dite «optimum carbone»;
- la possibilité, ou non, d'une charge bidirectionnelle pour rendre des services au système électrique.

La charge des véhicules est par ailleurs contrainte par la quantité d'électricité à recharger, qui dépend elle-même des **types de déplacement** qui sont effectués par les véhicules. C'est pourquoi des **profils de Mobilité** et de **Charge** ont été définis pour la modélisation 2030.

### a) Les profils de mobilité

L'étude considère différents types de déplacements : courte et longue distances, à des moments et selon des fréquences différentes, pour les berlines et pour les citadines. La portée des déplacements varie en fonction des segments pour intégrer le fait que les berlines roulent plus de kilomètres. Les profils de mobilité pour chaque segment sont répartis en fonction des déplacements dans l'année (nombre de jours et km parcourus).

#### Trois catégories de journées sont distinguées pour décomposer les 365 jours de l'année :

- du lundi au vendredi hors périodes de congés;
- week-ends et déplacements en période de congés (hors trajet aller-retour sur le lieu des vacances);
- journées de départ et retour de vacances.

Cette décomposition a été établie sur la base des hypothèses suivantes :

- \* 211 jours travaillés par an;
- \* 25 jours ouvrés de congés en été;
- \* 10 jours ouvrés de congés en hiver;
- \* 15 jours ouvrés de congés en demi-saison.

TABLEAU 15 : RÉPARTITION DES DÉPLACEMENTS EN FONCTION DES PÉRIODES ET EN NOMBRE DE JOURS

	Été		Hiver		Demi-saison	
	Semaine	Week-end	Semaine	Week-end	Semaine	Week-end
Lundi au Vendredi hors périodes de congés	40	-	55	-	115	-
Week-ends + déplacements en périodes de congés	25	24	10	24	15	52
Journées de départ et retour de vacances	-	2	-	2	-	-

Dans le cas des citadines, la répartition des 15 000 km par an, au sein des différentes journées, est établie sur la base de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD), publiée par le ministère en charge de l'environnement en 2008<sup>18</sup>. Cela permet d'estimer la fraction des kilomètres qui sont réalisés pour un type de journée, et donc d'en déduire la longueur des trajets par jour.

Pour les berlines, qui roulent 25 000 km par an, le choix a été fait de conserver identique aux citadines la longueur des trajets pour les départs et retours de vacances : 605 km. Les kilomètres sur les deux autres types de journées évoluent dans des proportions identiques de sorte à parvenir à une hausse globale du kilométrage. Ainsi, les jours de semaine en période scolaire voient les trajets s'allonger de 39 à 70 km, tandis que pour les week-ends et les déplacements en périodes de congés, les distances passent de 29 à 53 km. Il s'agit de moyennes, les distances pouvant être, bien sûr, beaucoup plus élevées pour des départs et les retours de week-ends.

TABLEAU 16 : RÉPARTITION DES KILOMÉTRAGES PAR TYPE DE DÉPLACEMENT ET EN NOMBRE DE JOURS POUR LES CITADINES

150 000 km par an	Km / an	Km / jour concerné
Lundi au vendredi - périodes scolaires	8 162	39
Week-ends + déplacements en périodes de congés	4 417	29
Journée de départs et retours de vacances	2 421	605

TABLEAU 16 : RÉPARTITION DES KILOMÉTRAGES PAR TYPE DE DÉPLACEMENTS ET EN NOMBRE DE JOURS POUR LES BERLINES

250 000 km par an	Km / an	Km / jour concerné
Lundi au vendredi - périodes scolaires	14 650	70
Week-ends + déplacements en périodes de congés	7 929	53
Journée de départs et retours de vacances	2 421	605

## b) Les profils et caractéristiques des charges des véhicules

Dans la projection à 2030, en plus des profils de mobilité, des profils de charge ont été pris en compte. Ceux-ci combinent profils de stationnement et profils de branchement.

### Profils de stationnement

L'étude prospective 2030 quantifie la probabilité d'un véhicule électrique d'être stationné ou non. Ce « profil de stationnement », défini à partir des données de l'ENTD, permet de quantifier la probabilité d'être branché au système électrique pour les périodes en-dehors des départs et retours de vacances. Dans ce dernier cas, le profil a été reconstitué pour les besoins de l'étude.

18 — <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1543/139/enquete-nationale-transports-deplacements-entd-2008.html>

Figure 9 : Probabilité d'être en stationnement pour un véhicule selon les types de journées

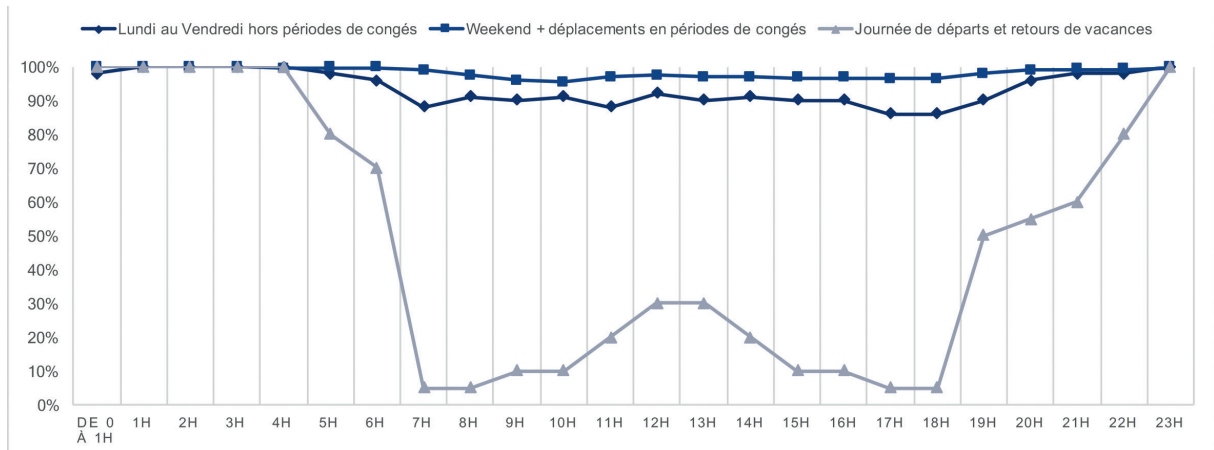
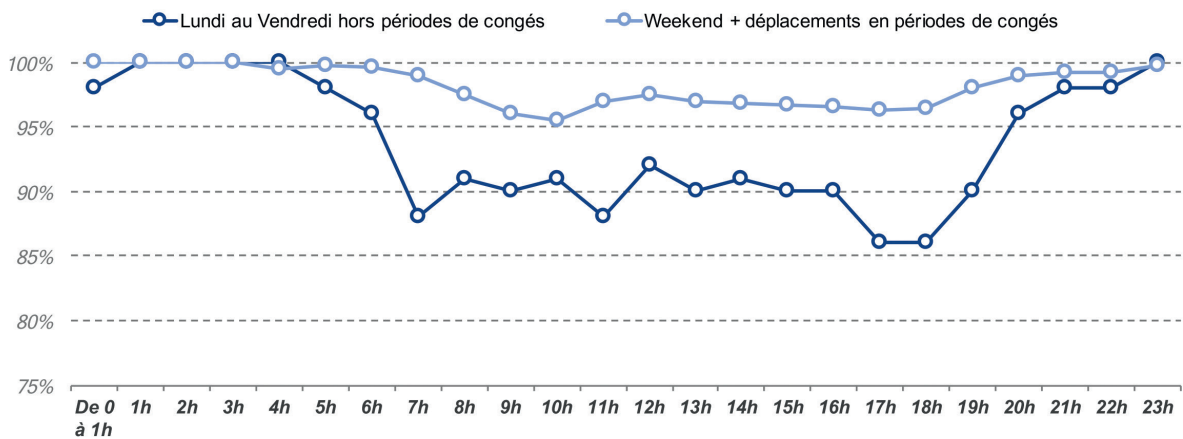


Figure 10 : Probabilité d'être en stationnement en dehors des départs et retours de vacances



### Profils de branchement

Des profils de branchement sont croisés avec les profils de stationnement. Ceux-ci caractérisent la probabilité d'un véhicule électrique à être branché ou non à une infrastructure de recharge et la puissance nominale de cette infrastructure.

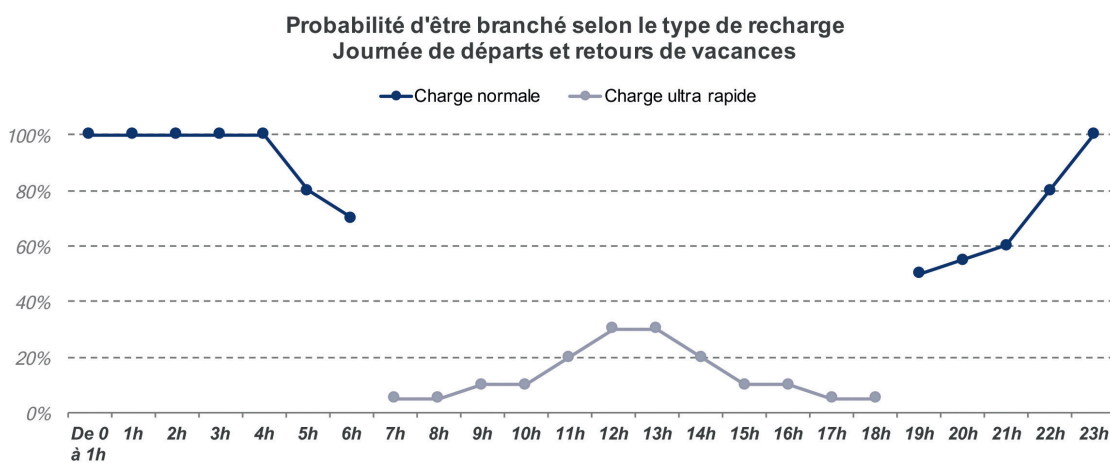
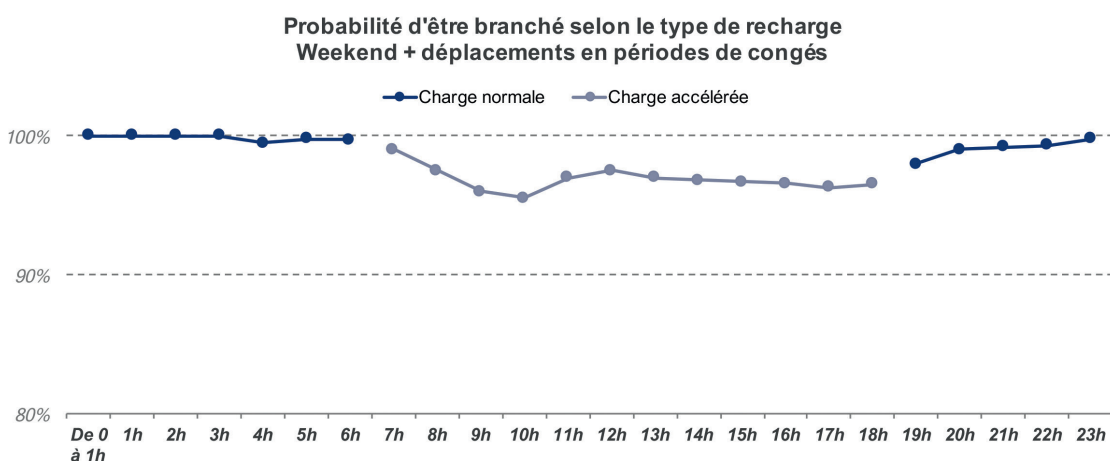
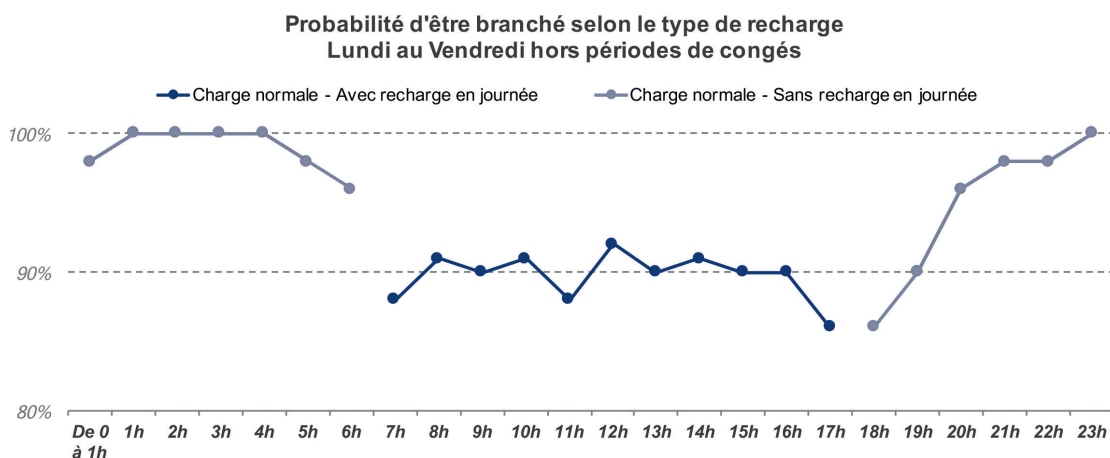
\* **La charge normale à 7 kW** : on la retrouve sur les lieux de résidence pour toutes les journées, et pour les charges des journées de la catégorie «Lundi au Vendredi hors périodes de congés». À la maison l'étude considère un taux d'accès à la prise résidentielle de 100%. Cette hypothèse s'appuie sur les récents déploiements et incitations (Loi Alur) et l'importance de ce critère pour les acheteurs potentiels. La proportion des véhicules ayant un accès à la prise en journée est un des paramètres qui varie entre les scénarios.

\* **La charge accélérée, à 22 kW**, présente sur les parkings de zones commerciales par exemple, est accessible à tous les véhicules dans les zones urbaines et périurbaines, elle est mobilisée pour les profils des journées «Week-end et déplacements en périodes de congés».

\* **La charge ultra rapide à 150 kW** est prise en compte lors des «Journées de départ et retour de vacances».

Les profils sont construits en considérant deux plages horaires, identiques à toutes les typologies de journée : la plage diurne de 7h à 18h, et la plage nocturne de 18h à 7h. Alors que les véhicules sont branchés à des infrastructures de charge normale pendant la plage nocturne, la puissance de la plage diurne dépend du type de journée.

Figure 11 : Profils de charge pour un véhicule moyen



Source : Vacances hypothèse Carbone 4

## Encadrement des profondeurs de charge / décharge

Les modalités de charge / décharge des véhicules sont un des déterminants de la durée de vie des véhicules. Or la durée de vie de la batterie est un paramètre important de cette étude :

- En premier lieu, la durée de vie des batteries pour la mobilité est considérée égale à 10 ans, comme le véhicule. Il s'agit d'une convention pour les constructeurs automobiles. Cette durée est raisonnable au regard de la littérature existante<sup>19</sup>, même si le recul manque pour apprécier la durée de vie de ces produits arrivés sur le marché français à partir de 2010.
- Par ailleurs, cette étude vise également à estimer les services rendus par la batterie en seconde vie, au-delà de 10 ans, pour une durée supplémentaire de 5 ans.

Pour ces raisons, une attention particulière a été portée aux modalités de charge / décharge, afin de garantir leur compatibilité avec une durée de vie de 10 ans pour la mobilité, sans dégrader leur capacité initiale au-delà de 20%.

L'étude a considéré notamment deux facteurs, l'état de charge (SoC) et la profondeur de décharge (DoD), qui interagissent au cours des cycles de charge/décharge. L'amplitude de ces états de charge et de décharge contribue à définir le rythme de vieillissement de la batterie. D'autres facteurs impactent la dépréciation des batteries, telles que la température où les usages de conduite. La contribution de ces facteurs au vieillissement des batteries ne fait pas consensus dans la littérature. Des hypothèses conservatrices ont donc été appliquées afin de limiter les cycles de charge et de décharge. Les états de charge moyens ne dépassent pas 90% et ceux de décharge 25%, avec une amplitude limitée à 65%.

TABLEAU 18 : MODALITÉS DE CHARGE-DÉCHARGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES EN FONCTION DES TYPES DE CHARGE

	Etat de charge (SoC) - % min - max	Profondeur de charge (DoD) - %
Recharge normale	50-90	40
Recharge accélérée	40-90	50
Recharge ultra rapide	25-90	65

Le système de gestion de la batterie (Battery management system - BMS) est un élément clé de la durée de vie des véhicules, intégré dans les packs batteries. Il vérifie l'état de santé (State of Health/ SoH) et l'état de charge (State of Charge / SoC) de la batterie, en mesurant et en contrôlant les paramètres clés pour assurer un fonctionnement optimal du pack.

## Charge naturelle, charge optimum carbone et V2G

L'impact des batteries en phase d'usage inclut la consommation d'électricité nécessaire à l'utilisation des véhicules. Dans la modélisation, nous reconstituons les flux horaires d'électricité entre la batterie et le réseau électrique pour les différentes modalités de charge : charge naturelle, charge optimum carbone et V2G.

\* **Charge naturelle** : les véhicules électriques se rechargent jusqu'au plafond de charge dès qu'ils sont branchés à une infrastructure de recharge, sans contrainte réglementaire ni incitation tarifaire pour décaler les heures de recharge. C'est le comportement par défaut pour les véhicules.

\* **Charge optimum carbone** : dans ce cas de figure on suppose que les véhicules sont rechargés de manière contrôlée afin d'avoir un impact maîtrisé sur le système électrique. Cela peut se traduire par exemple par le fait que les véhicules se rechargent pendant les heures creuses, grâce à ? la réception de signaux tarifaires favorables au consommateur. Pour la modélisation nous avons supposé que la charge s'effectue sur les heures où l'impact carbone du kWh est le plus faible.

\* **Le Vehicle-to-Grid (V2G)** correspond à une fonction secondaire des batteries. Cette technologie permet que les batteries soient utilisées comme unités de stockage d'électricité capables de restituer l'électricité au réseau lors des pics de consommation (« peak shaving ») ou d'absorber l'électricité du réseau (notamment l'énergie fatale des énergies renouvelables) lors des heures de faible consommation (« valley filling »). Le V2G permet un échange bidirectionnel d'électricité qui décrit un système dans lequel les véhicules communiquent avec le système électrique pour offrir une réponse à la demande où en renvoyant de l'électricité vers le réseau quand cela est utile.

19 – «Electric vehicle battery Ageing in real-driving conditions: a review», october 2016, CREARA, Spain.

**Remarques particulières :** la charge optimum carbone permet, par rapport à une charge naturelle, de réduire l'impact carbone de la consommation d'électricité des véhicules (sans avoir d'incidence sensible sur les autres indicateurs environnementaux comme cela est montré dans la partie résultats du rapport). L'étude considère par ailleurs que la charge V2G permet des émissions évitées dans le système électrique. En injectant de l'électricité aux moments où le mix électrique est le plus carboné, on attribue un évitement d'émissions de gaz à effet de serre correspondant à la moyenne des émissions de production d'un kWh à l'heure considérée (les pertes de rendement sont prises en compte). La différence entre les émissions additionnelles induites par le soutirage et les émissions évitées par l'injection, permettent de quantifier un évitement net d'émissions d'attribué au V2G.

Charge naturelle et charge optimum carbone sont des modalités de charge qui ont également été intégrées dans l'exercice prospectif du Bilan Prévisionnel de RTE dans son édition 2016 (voir p. 47). Le rapport quantifie l'appel de puissance généré par un parc d'un million de VE et VHR, dont les modalités de charge seraient à 60 % naturelle et répondrait à 40 % au signal tarifaire d'heure creuse (une charge qui serait moins finement pilotée que celle qui est ici envisagée comme optimum carbone). Dans ce cas, on observerait une pointe à 23h de l'ordre de 0,9 GW en hiver et 0,6 GW en été.

### c) Rendement des charges et des batteries

Une hypothèse de 5% de perte électrique à la charge a été mesurée pour la charge normale en 2030. Ces 5% d'électricité supplémentaire affectent l'impact de la phase d'usage. Cette phase d'usage représente 10 à 30% de l'impact total selon l'indicateur environnemental considéré, le taux de perte en charge normale est donc en définitive un facteur qui porte sur le centième de l'impact total. L'impact des pertes en charge

normale sur les émissions associées au véhicule est donc négligeable et n'est pas intégré aux valeurs totales d'impact.

Néanmoins, dans la présentation des résultats, la consommation pour la mobilité est donnée selon une fourchette de valeurs : sans perte à la charge – avec perte de 10% (cf. Tableau 5 Chapitre Résultats)].

### d) Capacités globales des batteries sur la durée de la première vie, répartition des usages et limitation du V2G

L'étude prend pour hypothèse que le développement des «smart grids» pourrait participer à la multiplication des charges en optimum carbone et du V2G sans compromettre les besoins de mobilité des véhicules.

Pour cela, deux précautions ont été prises en compte afin de préserver la durée de vie des batteries. C'est-à-dire pour conserver une capacité suffisante permettant un second usage des batteries :

- La plage de fonctionnement en V2G a été limitée à une durée maximum de 2 heures par plage ininterrompue de branchement (par exemple la nuit au domicile, ou en milieu de journée sur le lieu de travail).
- Le V2G en première vie peut être volontairement limité. Cette limite est calculée à partir de la capacité disponible totale sur la durée de la batterie en première vie, à laquelle on soustrait les besoins prioritaires de mobilité. Cette capacité totale de la batterie est déterminée par sa variante de chimie.

Une limitation volontaire du V2G, qui ne concerne pas tous les véhicules, est calculée à partir de la capacité disponible totale sur la durée de la batterie en première vie, à laquelle on soustrait les besoins prioritaires de mobilité. Selon nos hypothèses, après 10 ans, la capacité résiduelle moyenne correspond à 80% de la capacité initiale.

TABLEAU 19 : CAPACITÉS GLOBALES (MWH ÉCHANGEABLES SUR 10 ANS) DES BATTERIES SUR LA PREMIÈRE VIE EN FONCTION DES HYPOTHÈSES DE BATTERIES

	Citadines			Berlines		
	VHR	VE-REX	VE	VHR	SUV-4X4 - VHR	VE
HYP 1 : Efficacité	35	90	90	40	40	90
HYP 2 : Course à l'autonomie	40	90	90	50	50	90
HYP 3 : Baisse de 40 à 50% de la masse des batteries	30	60	60	40	40	90

Sur la base de ces capacités totales, l'énergie échangée pour l'usage principal, la mobilité, est soustraite, pour déterminer la capacité disponible d'échanges en V2G, et ainsi vérifier la cohérence avec les usages proposés dans le cadre de l'étude.



TABLEAU 20 : CAPACITÉ D'ÉCHANGES D'ÉNERGIES DES BATTERIES EN FONCTION DES HYPOTHÈSES D'ÉVOLUTION DES BATTERIES

Véhicule considéré	Usage mobilité moyen considéré (MWh)	Hypothèse 1 : Croissance de l'efficacité énergétique des batteries		Hypothèse 2 : Croissance de l'autonomie des batteries		Hypothèse 3 : Maîtrise de la croissance des batteries	
		Échanges tolérés sur 10 ans (MWh)	Capacités disponibles pour les services réseaux (MWh)	Échanges tolérés sur 10 ans (MWh)	Capacités disponibles pour les services réseaux (MWh)	Échanges tolérés sur 10 ans (MWh)	Capacités disponibles pour les services réseaux (MWh)
Citadine - VHR	15,2	35	19,8	40	24,8	30	14,8
Citadine -VE-REX	17,2	90	72,8	90	72,8	60	42,8
Citadine - VE	19	90	71	90	71	60	71
Berline - VHR	30	40	10	50	10	40	10
SUV-4X4-	39	40	1	50	11	40	1
Berline VE	49,5	90	40,2	90	40,2	90	40

Ce contrôle de cohérence amène à limiter l'usage secondaire de la batterie pour rendre des services au système électrique pour les trois VHR, et dans les trois hypothèses de batteries. Si la pratique du V2G est maintenue les week-ends et les jours de semaine en périodes de congés, elle est en revanche limitée les journées de déplacement hors périodes de congés pour ces véhicules.

Pour se faire, on limite un « potentiel » de V2G. Ce potentiel « x » étant calculé selon la formule suivante :

$$\text{Usage mobilité} + \text{V2G [week-ends et semaines de congés]} + x * \text{V2G [jours de déplacements réguliers]} = \text{limite des échanges tolérés}$$

Les valeurs prises en compte pour marquer les limites des échanges tolérés sont les suivantes (uniquement pour VHR, berlines et citadines) :

- dans le cas d'une utilisation sans accès à une borne en journée pour les déplacements du quotidien :
  - > HYP1 : 28% pour berline,
  - > HYP2 : 97% pour citadine, 64% pour berline,
  - > HYP3 : pas de limitation;
- dans le cas d'une utilisation avec accès à une borne en journée pour ces déplacements :
  - > HYP1 : 61% pour la citadine VHR, 2% pour la berline VHR,
  - > HYP2 : 48% pour la citadine VHR, 32% pour la berline VHR,
  - > HYP3 : 51% pour la citadine, 20% pour la berline VHR.

## 6.6. Hypothèses et modélisation de la consommation d'électricité

Pour connaître l'impact environnemental de la consommation d'électricité des véhicules électriques et les gains potentiels du V2G et de la 2nde vie de la batterie, il est nécessaire d'attribuer un impact environnemental à chaque kWh consommé (ou chaque kWh injecté sur le réseau électrique). Pour cela il faut calculer l'impact environnemental moyen de l'électricité heure par heure d'une part, et des flux horaires d'électricité entre la batterie et le réseau électrique d'autre part.

### a) Mix électrique

Pour l'ACV 2016, c'est le mix électrique français (2015) qui est considéré pour l'ensemble des phases d'usage et de fin de vie des véhicules. Le mix électrique considéré pour la phase de fabrication, des véhicules et leur batterie, varie en fonction des zones de production.

La projection à 2030 intègre trois hypothèses de mix électriques. Deux d'entre-elles sont associées directement aux scénarios explorés. Une hypothèse supplémentaire est introduite pour tester les effets d'une augmentation des énergies fossiles dans le mix électrique.

### Hypothèse du scénario de référence : Ambition transition énergétique

Cette hypothèse de mix reprend les caractéristiques du nouveau mix proposé par RTE dans son bilan

Figure 12 : Mix électrique 2015

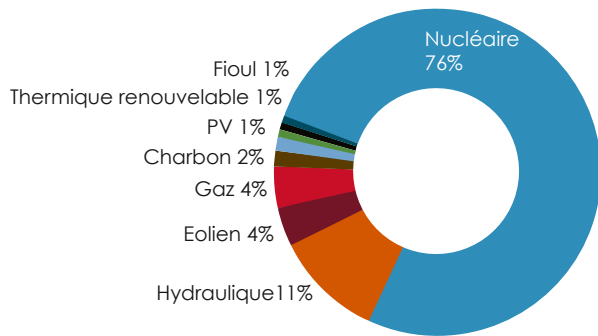


Figure 13 : Mix Ambition Transition énergétique 2030 (39% ENR)

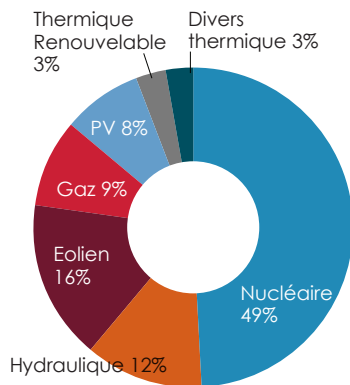


Figure 14 : Mix vers 100% ENR (43% ENR)

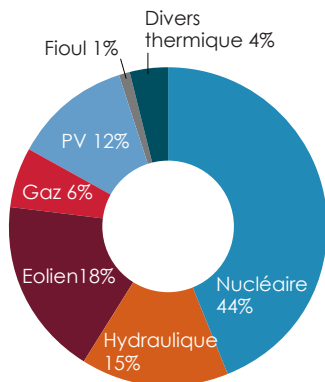
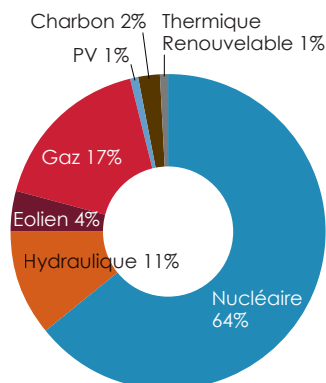


Figure 15 : Mix carboné (19%-17% ENR Fossile)



prévisionnel de 2014 [Scénario D «Nouveau mix»<sup>20</sup>], et est actualisée au regard des objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie publiée en juillet 2016. Les objectifs sur les énergies renouvelables définis pour 2023 ont été extrapolés à l'horizon 2030.

Les valeurs suivantes sont retenues :

- Part d'énergies renouvelables : 39% ;
- La part du nucléaire baisse après la 4ème visite décennale, pour atteindre 49% ;
- Les énergies fossiles représentent 12% du mix.
- Par ailleurs la production baisse de plus de 20 TWh pour s'établir à 519 TWh par an.

Ce mix est intégré au scénario de référence, et dans le scénario 1 «Ambition transition énergétique ».

### Mix «Ambition 100% ENR»

Ce scénario est inspiré du scénario 100% EnR en 2050 issu de l'étude publiée par l'ADEME en 2016<sup>21</sup>. Il est un jalon intermédiaire en 2030 vers la variante « avec acceptabilité modérée » en 2050 qui comprend moins d'éolien terrestre et davantage de panneaux photovoltaïques. Dans ce mix, les EnR représentent 46%, le nucléaire 44% et le fossile 10%. La consommation d'électricité baisse substantiellement si bien que la production baisse de plus de 80 TWh / an. Ce mix est intégré au scénario 3 «Accélération en faveur des énergies renouvelables ».

### Mix carboné : la «ligne rouge»

En complément, un mix carboné, contenant davantage de fossiles, est calculé, à titre indicatif. Celui-ci sert de «ligne rouge». En effet, dans ce scénario, la baisse de la part du nucléaire ne s'accompagne pas d'un développement suffisamment rapide des filières renouvelables. La compensation s'effectue par un recours aux énergies fossiles qui représenteraient près de 20% du mix de production en 2030.

### Niveaux de consommation des différents mix

Alors que la consommation d'électricité est aujourd'hui à un niveau stable (RTE, bilan prévisionnel 2016<sup>22</sup>), la consommation globale est à la baisse dans le cas du scénario nouveau mix -PPE, conformément

20 – Cette étude a été menée sur la base des données long terme du Bilan Prévisionnel 2014 de RTE, et non à la lumière des simulations du Bilan Prévisionnel 2017, l'élaboration de celui-ci étant postérieure à l'étude et encore en cours au moment de la finalisation du document.

21 – ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations- Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050 », juin 2016.

22 – Cette étude a été menée sur la base des données long terme du Bilan Prévisionnel 2014 de RTE, et non à la lumière des simulations du Bilan Prévisionnel 2017, l'élaboration de celui-ci étant postérieure à l'étude et encore en cours au moment de la finalisation du document.

aux objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie (de 546 à 519 TWh par an, soit 5% de baisse). Cette baisse s'explique par les effets d'une plus grande efficacité énergétique des principaux postes de consommation. Le mix carboné, traduction d'une politique énergétique qui s'essouffle, voit le niveau de consommation globale stagner à 546 TWh/an. Enfin, un mix Vers 100% ENR traduit une politique volontariste misant sur l'efficacité, et la sobriété, et maximise l'installation des moyens de production des renouvelables; le niveau de consommation globale baisse de plus de 15%, à 462TWh/ an.

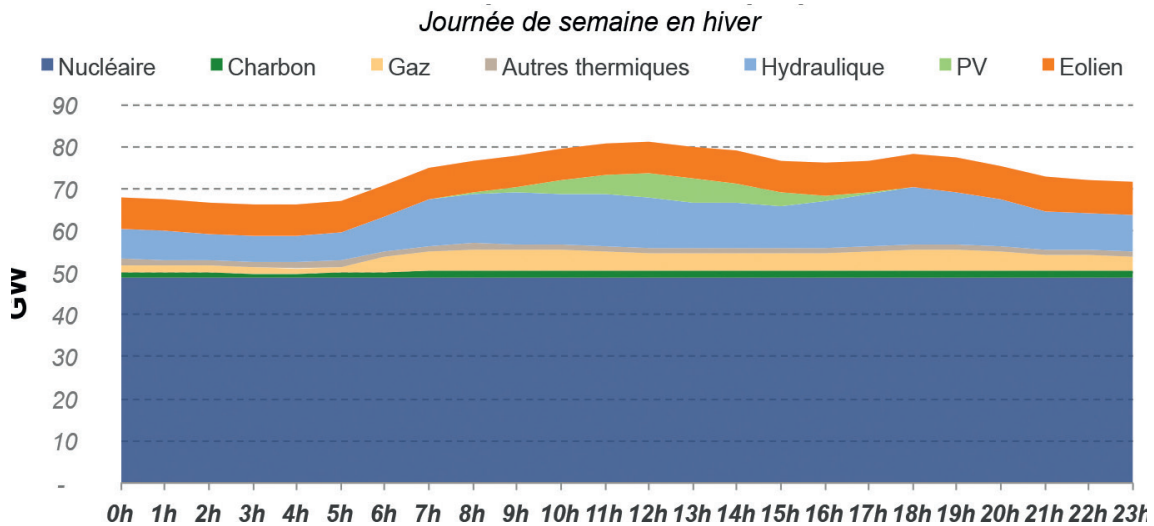
TABLEAU 21 : NIVEAU DE CONSOMMATION DANS CHACUN DES 3 SCÉNARIOS POUR LE MIX ÉLECTRIQUE	
Consommation TWh/an en 2016	
Nouveau Mix/ PPE	519
Vers 100% EnR	462
Mix moyen fossile	546

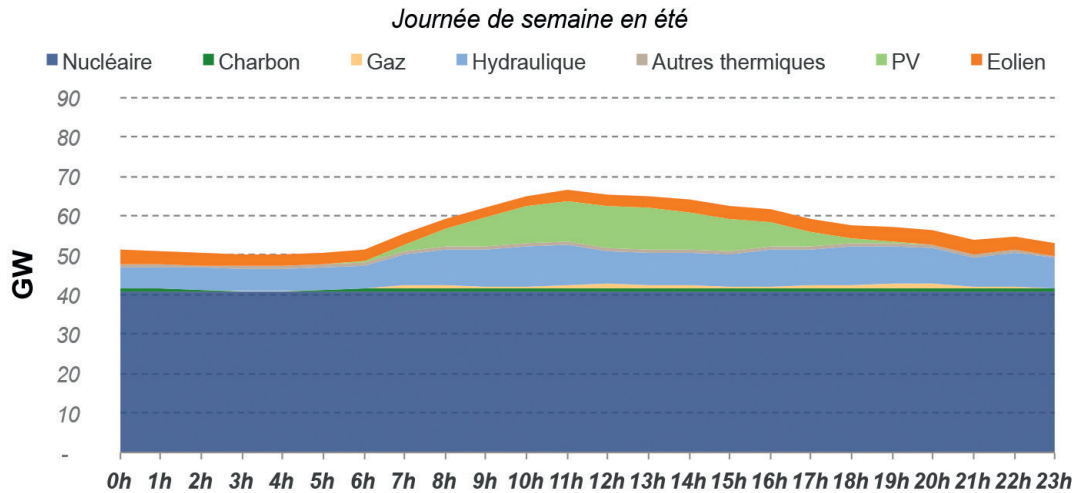
### b) Profils de production électrique heure par heure

Des profils horaires de production ont été établis pour 6 journées types correspondant à trois types de saison (hiver, été et demi-saison) et deux types de journées dans la semaine (du lundi au vendredi d'une part, journée de week-end d'autre part). Ceux-ci sont fondés sur des données servant au calcul d'équilibre offre-demande à pas horaire en fonction des aléas météorologiques qui ont été fournis par le gestionnaire de réseau de transport d'électricité français, RTE.

Les données initiales de RTE correspondent au mix électrique actuel. Pour aboutir aux profils de production en 2030 dans les différentes options de mix électrique, la production horaire des différentes filières en 2016 est multipliée au prorata des bilans annuels de production de chaque filière entre 2016 et 2030. Deux exemples des journées moyennes ainsi obtenues, dans le cadre du mix électrique de référence (Nouveaux Mix / PPE) sont présentés ci-dessous :

Figure 16 : Profils horaires de production électrique par filière





### c) Impact environnemental de la consommation d'électricité heure par heure

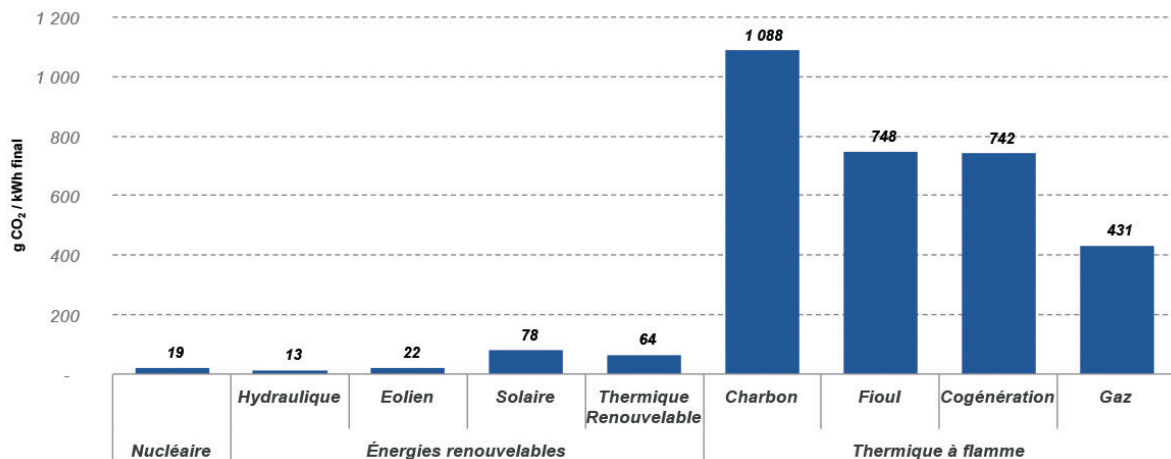
L'impact environnemental de l'électricité à une heure donnée est calculé sur la base des profils de production horaire dont le calcul est expliqué dans la section précédente (Section 6.6.b). Pour une heure donnée, la contribution de chaque filière électrique (gaz, nucléaire, éolien, etc.) à la production totale de l'heure en question a été explicitée. **L'impact environnemental moyen de l'électricité à cette heure précise est alors obtenu en appliquant un facteur d'impact à chaque moyen de production, pondéré par sa proportion dans le mix horaire.**

Les facteurs d'impacts par filière (pour les cinq indicateurs environnementaux) quantifient l'impact environnemental de la production d'1 kWh pour une filière donnée. Ils sont issus de la base de données EcoInvent version 3.2, publiée en 2015<sup>23</sup>. Il s'agit des facteurs d'impacts qui ont été utilisés dans la démarche de Performance Environnementale du Bâtiment Neuf

initiée par les pouvoirs publics et visant à aboutir aux impacts pour les différents usages de l'électricité dans le bâtiment (chauffage, eau chaude etc.). Dans le cadre de la présente étude, ce ne sont pas les facteurs d'impacts par usage qui ont été utilisés, mais bien les impacts par filière de production. Ces facteurs d'impacts sont calculés sur un périmètre étendu, au-delà des facteurs des moyens de production. Ceux-ci comprennent la construction des moyens de production et leur exploitation, l'impact sur site et amont des combustibles le cas échéant, y compris enrichissement de l'uranium en ce qui concerne le nucléaire, et le traitement des déchets (notamment nucléaires).

Les impacts du kWh ainsi calculés tiennent également compte des émissions des infrastructures de transport et de distribution d'électricité (impact de construction et d'exploitation) et des pertes ayant lieu depuis la production jusqu'à la distribution aux consommateurs. Les impacts au kWh sont illustrés sur le graphique ci-dessous pour le cas du CO<sub>2</sub> :

Figure 17 : Facteurs d'émissions par filières de production électrique



23 – La base EcoInvent fournit des inventaires d'émissions des gaz à effet de serre, qui sont utilisés dans les ACV. Mais il peut y avoir un biais entre la valeur du facteur d'émission fourni par GaBi, et celle d'un mix moyen avec les FE EcoInvent (- 2 g CO<sub>2</sub> d'écart, sur un total d'environ 96). Les auteurs de l'étude assument ce biais méthodologique potentiel, de par la faiblesse de son impact sur les résultats finaux de l'étude.

#### d) Flux horaires d'électricité entre la batterie et le réseau électrique lors de la 1<sup>ère</sup> vie

##### **Calcul des flux horaires : principe du croisement des profils horaires entre six types de journées**

Les flux horaires sont issus du croisement des trois types de profils horaires présentés précédemment :

- **Les profils de mobilité** qui déterminent la consommation d'électricité des véhicules pour les journées type;
- **Les profils de branchement des véhicules** qui déterminent à quelle puissance et quand les véhicules sont raccordés pour les journées type ;
- **L'impact environnemental de l'électricité produite** qui détermine, pour chacun des indicateurs environnementaux considérés, l'impact de la production de l'électricité heure par heure, pour les différentes journées type et pour trois saisons différentes.

À la différence des profils de production électrique qui varient selon les scénarios considérés, les profils de mobilité et de branchement sont communs aux trois scénarios envisagés pour 2030. Toutefois, au sein des scénarios, l'hypothèse d'accès à une infrastructure de recharge en journée varie.

Ces profils sont établis pour six cas de figure : six journées type correspondant à trois types de saison (hiver, été et demi-saison) et deux types de journées dans la semaine (du lundi au vendredi d'une part, journée de week-end d'autre part). L'impact environnemental de la charge des véhicules électriques est calculé pour chacun de ces six cas de figure, puis l'impact total est reconstitué en pondérant les cas de figure par leur proportion respective (exprimé en kWh échangés sur l'année).

##### **Calcul de la quantité d'électricité à recharger par plage horaire**

Quelle que soit la catégorie de journées, celle-ci est découpée en deux plages : la journée (de 7h à 18h) et la nuit (de 18h à 7h). Selon les kilomètres parcourus dans chaque catégorie, on connaît le nombre de kWh que les véhicules doivent recharger sur chacune de ces deux plages. Pour cela il faut calculer la consommation électrique à partir des kilomètres parcourus et de la consommation unitaire électrique des véhicules. Dans le cas des véhicules partiellement électriques, il est tenu compte de la répartition entre mode thermique et mode électrique de la consommation, avec une distinction entre trajets de grande portée (départs et retours de vacances) et les autres trajets

qui sont plus courts. En effet dans le cas des trajets de longue distance, la proportion des kilomètres effectués en mode électrique est limitée par l'autonomie des batteries des véhicules. La répartition moyenne sur l'année, qui est une hypothèse d'entrée pour ces véhicules, détermine alors la proportion de la motorisation électrique sur le reste des trajets. Sur une plage horaire donnée, la quantité d'énergie à recharger est alors la moitié de l'énergie dépensée pour déplacer le véhicule, puisqu'il y a deux plages distinctes dans la journée.

##### *Il y a deux exceptions :*

1. Dans le cas des départs et retours de congés, pour certaines hypothèses de batterie de la citadine VE, il est nécessaire d'introduire une deuxième recharge en journée pour pallier l'autonomie qui ne permet pas d'effectuer un seul arrêt de recharge;
2. Dans le cas où le véhicule n'a pas accès à une infrastructure de recharge pendant la journée, il faut bien sûr recharger tous les kWh dépensés lors de la plage nocturne.

Par ailleurs, connaître les kWh à recharger implique de connaître l'état de charge de la batterie au moment où elle arrive en branchement. En effet, elle avait nécessairement quitté son précédent emplacement avec un état de charge de 90% de la capacité initiale. Ainsi, l'état de charge au branchement suivant est connu en déduisant la quantité d'électricité consommée entre temps.

##### **Recharge des kWh d'une plage horaire selon les différents modes de charge**

Les kWh du véhicule moyen sont rechargés au prorata du profil de branchement normalisé sur la plage horaire. Par exemple si 10% des recharges s'effectuent entre midi et 13h selon le profil de branchement sur la plage de 7 à 18h, et que le véhicule considéré doit recharger 20 kWh, alors 2kWh pourront être rechargés sur ce créneau, dans la limite toutefois de la puissance accessible à cette heure précise.

*Pour la charge naturelle :* elle s'effectue dès le début de plage pour tous les types de charge. Selon le nombre de kWh à recharger, et compte tenu de la probabilité d'être branché (profil de branchement), les kWh sont rechargés à la puissance accessible jusqu'à ce que la batterie soit pleine.

Pour les charges normales qui ont lieu la nuit pour toutes les catégories de journées, et parfois les jours de semaine sur des bornes de recharge normale accessibles en journée, des modes de calculs spécifiques sont introduits pour remplacer la charge naturelle :

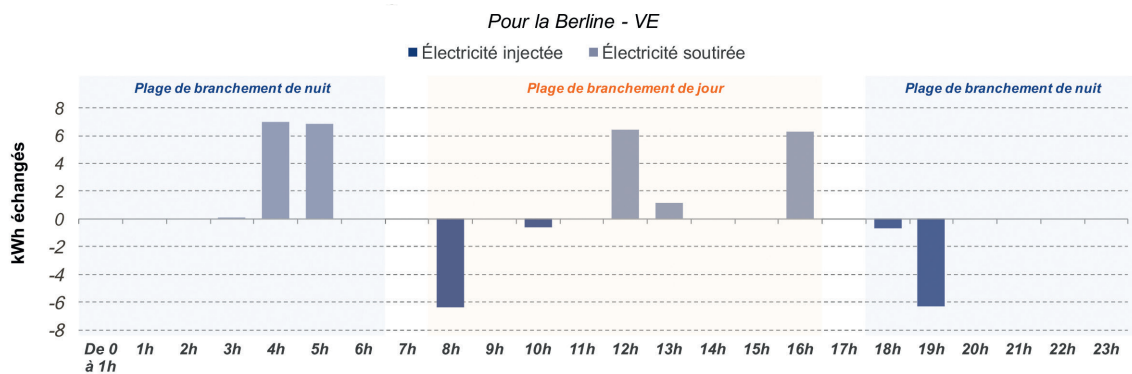
\* **Par une charge optimum carbone** : pour chaque plage horaire (jour ou nuit), les heures de recharge sont classées par ordre croissant d'impact CO<sub>2</sub>, et les véhicules se rechargent d'abord sur les heures qui ont un contenu carbone faible (par exemple entre midi et 16h et entre minuit et 4h du matin) ;

\* **Par une charge V2G**, les heures sont également classées par ordre croissant d'impact CO<sub>2</sub>, mais également en ordre décroissant pour les heures où la production électrique est la plus émettrice. Dans ce cas, les véhicules se déchargent à l'heure la plus carbonée, pour soutenir la production électrique lors de la pointe de consommation, et se chargent aux heures les moins carbonées. Il faut noter que l'état de charge minimum de la batterie lorsqu'elle est branchée est encadré par une borne maximum et une borne minimum. Ainsi le V2G est en théorie encadré au sein de ces deux bornes de fonctionnement. En pratique la limitation du V2G

provient des caractéristiques introduites pour préserver les batteries sur leur vie complète, expliquées dans la section relative aux batteries (Section 6.5.d). D'abord les possibilités d'échanges hors besoin de mobilité sur une plage horaire donnée sont limitées à 2h (1h pour un flux vers le réseau, et 1h pour un flux depuis le réseau). Puis, les flux de V2G peuvent être réduits pour respecter une borne maximum d'échanges de kWh tolérés sur les 10 ans de fonctionnement en première vie des batteries.

Les flux horaires entre la batterie et le réseau électrique (flux éventuellement bidirectionnels) sont obtenus pour tous les cas de figure, et pour chaque catégorie de journée. Un exemple est donné sur le graphique ci-dessous pour la berline 100% électrique, dans le cas d'une journée de semaine avec accès à une borne en journée et avec la modalité de recharge en V2G.

Figure 18 : Echanges d'électricité avec le véhicule en V2G



Dans ce cas de figure, le véhicule se recharge d'environ 14 kWh entre 4h et 6h du matin, puis entre 12h et 15h. La moitié de ces kWh est réinjectée sur le réseau pour soutenir la production, principalement entre 8 et 9h, et 19 et 20h. Cela provient du fait que pour le scénario de mix électrique et le type de journée considérés, l'électricité est le plus carbonée à ce moment-là et elle est le moins carbonée aux heures de recharge.

### e) Modulation de l'impact sur le système électrique et services potentiels en 1ère vie

En parallèle, les indicateurs d'impacts environnementaux de la consommation d'électricité heure par heure, sont également établis pour chaque catégorie de journée et dans les trois types de saisons, ce qui permet de connaître l'impact environnemental rapporté au kWh moyen consommé par le véhicule. Les flux sont ensuite croisés avec l'indicateur d'impact environnemental.

Cet impact environnemental est complété par 3 indicateurs permettant d'évaluer la sensibilité de l'impact des véhicules électriques sur la consommation électrique, ainsi que les services rendus par les batteries des véhicules au système électrique :

\* **Énergie décalable** : en charge optimum carbone (et V2G inclus), les véhicules électriques peuvent reporter leur charge ; cet indicateur correspond à l'ensemble de l'énergie qui peut être ainsi décalée sur l'année.

\* **Énergie injectée** : en charge V2G, les véhicules électriques peuvent réinjecter de l'énergie sur le système électrique local. Cet indicateur correspond à l'ensemble de l'énergie injectée une année.

\* **Potentiel d'énergie injectable entre 18 et 20h** : cet indicateur correspond au gisement que pourrait être le V2G en allant au-delà des limitations prises dans le modèle. L'énergie et la puissance accessibles pour le système électrique à travers le V2G (en respectant la contrainte d'un état de charge minimal [SoC] de la batterie) sont calculés compte tenu de l'état de charge des véhicules sur la plage 18-20h (hors weekends de départs et retours de congés).

#### f) Limites liées à la modélisation de la consommation d'électricité des véhicules

La consommation d'électricité en France est évaluée comme stable (source RTE, bilan prévisionnel 2016). L'hypothèse retenue dans cette étude est que les nouveaux besoins liés à l'électromobilité ne génèrent pas de surplus de consommation d'électricité à même de nécessiter des besoins de production supplémentaires. Cette hypothèse s'appuie sur la tendance baissière observée dans le bâtiment notamment et sur l'étude d'Artelys et d'Element Energy de 2015 intitulée, «EV Grid Synergy Analysis for France»<sup>24</sup>.

L'impact environnemental de la production d'électricité tient compte uniquement du mix français de production, et n'est pas corrigé des imports et des exports. Cela est une limite de l'étude. Si l'objet et le périmètre de l'étude ne permettent pas de reconstituer l'ensemble de la production sur la plaque européenne, ni de modéliser les capacités d'interconnexions du réseau français, cette sensibilité aux échanges transfrontaliers doit être gardée à l'esprit. Pour cette étude, les auteurs anticipent une trajectoire de décarbonation des mix électriques à l'échelle européenne, si bien qu'à l'avenir la production des pays voisins sera moins émettrice de CO<sub>2</sub>.

Par ailleurs, pour apporter une nuance vis-à-vis des résultats de l'impact carbone de la production d'électricité, ceux-ci ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité portant sur l'impact avec un mix marginal de production (cf. Chapitre 2. Résultats, Partie 2).

## 6.7. Seconde vie de la batterie

L'étude a pour objectif de prendre en compte les impacts tout au long du cycle de vie des véhicules électriques, y compris au-delà de la vie du véhicule. L'analyse intègre donc les services rendus au système énergétique pendant la seconde vie des batteries.

### a) Durée de la seconde vie

La durée de la seconde vie dépend de l'usage qui en est alors fait, et des profils de charge (durée et intensité du cycle de charge / décharge). Ces paramètres multiples et l'absence de retours suffisants à ce jour de batteries en fin de vie rendent le calcul de la durée de la seconde vie incertain. L'étude assume les incertitudes pour cette partie de l'étude.

Au-delà d'une réduction de 50% de sa capacité, la batterie n'est plus considérée comme capable de rendre un service au réseau et la «chute de capacité» est estimée trop élevée. La batterie est alors recyclée.

Sur base des interviews menées lors de l'analyse (R&D, constructeurs, recycleurs), la durée de la seconde vie varie entre 3 et 7 ans. C'est pourquoi l'étude prend en compte une durée de 5 ans, soit une hypothèse prospective intermédiaire. La durée de 5 ans est une hypothèse conservatrice.

### b) Passage de la première à la seconde vie

Le passage de la première à la seconde vie est ici considéré comme « direct ». C'est à dire que la seconde vie intervient après la phase de collecte des batteries dont la capacité est réduite de 20%. La batterie est par la suite reconditionnée dans des pack batteries adaptés à l'application en seconde vie.

En plus du fait que la problématique juridique de définition du producteur de la batterie en seconde vie n'ait pas été traitée dans cette étude, la méthodologie comporte deux limites :

- La totalité des batteries (100%) est considérée comme collectée même si un taux de perte de 5% pourrait être estimé comme étant raisonnable; ce chiffre s'appuie sur des données confidentielles fournies en phase finale de l'étude, elles n'ont pu être intégrées à la modélisation prospective.
- L'intégration d'un nouveau système de gestion de la batterie (BMS), qui peut peser jusqu'à 5% de l'impact global du véhicule en fonction des indicateurs, n'est pas pris en compte dans l'étude d'impact. L'absence de données robustes ne permet pas d'intégrer les impacts liés au reconditionnement. Cette limite de l'étude est assumée par les auteurs.

24 – <https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2016/12/Electricity-synergy-report.pdf>

### c) Evaluation du stock de batteries en seconde vie en 2030

Pour évaluer le stock de batteries de seconde vie disponibles dans les scénarios en 2030, l'analyse s'appuie sur le scénario de référence de Stratégie de développement de la mobilité propre<sup>25</sup>. Le groupe d'experts a donc considéré un nombre de batteries ayant une capacité inférieure ou égale à 80%, pour les usages de deuxième vie, à partir du stock de véhicules électriques et hybrides rechargeables en France en 2020.

Une autre façon de raisonner est de considérer l'ensemble des batteries utilisées en deuxième vie à partir de 2030, sur la base de nature du parc des véhicules électriques en 2030. C'est-à-dire correspondant au stock de batteries en seconde vie en 2040. La modélisation de ces deux cas de figure permet d'évaluer des potentiels de stockage en seconde vie :

1. Stock de batteries en deuxième vie en 2030 : avec 961 322 batteries pour le scénario 1, 1500000 pour le scénario 2 et 500000 pour le scénario 3;
2. Stock de batteries en deuxième vie en 2040 : avec le même nombre de batteries que le nombre de véhicules électriques dans le parc, c'est-à-dire 4,4 millions dans le scénario 1, 5,5 millions dans le scénario 2 et enfin 1,5 millions dans le scénario 3

L'analyse a été réalisée sur le stock de batteries en deuxième vie en 2030 et une sensibilité est réalisée en 2040. Les deux stocks de batteries prennent en compte les hypothèses de capacités présentées dans la section 6.4.

TABLEAU 22 : EVALUATION DU STOCK DE BATTERIES EN SECONDE VIE POUR LES 3 SCÉNARIOS

	Scénario 1 Ambition transition énergétique	Scénario 2 Accélération en faveur des énergies renouvelables	Scénario 3 Renoncement Politique
Stock de batteries en deuxième vie en 2030	961 322	1 500 000	500 000
Stock de batteries en deuxième vie en 2040	4 400 000	5 500 000	1 500 000

### d) Modèle de calcul du service de stockage rendu par la batterie en seconde vie

La modélisation permet de calculer un service rendu.

Deux indicateurs sont considérés :

- le volume d'énergie stockées - à partir de la capacité de la batterie - sur la base d'un cycle de charge / décharge par jour;

- les émissions de CO<sub>2</sub> évitées.

Ces deux indicateurs permettent d'apprécier la contribution du stockage stationnaire à la maîtrise de la consommation d'énergie.

Les hypothèses de la modélisation sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU 23 : MODÉLISATION DE LA SECONDE VIE

	Années	5
Durée de la seconde vie		
Capacité en début de seconde vie	% de la capacité initiale	80
Capacité en fin de seconde vie	% de la capacité initiale	50
Capacité moyenne durant la seconde vie	% de la capacité initiale	65
Nombre de cycles de charge/décharge quotidiens	-	1
Amplitude du cycle par rapport à la capacité existante (dégressive)	%	90
Rendement de la batterie	%	85

25 – Stratégie de développement de la mobilité propre, Ministère en charge de l'environnement, 2016.



## Deux modes de calculs sont réalisés :

**L'approche marginale** : chaque kWh stocké par la batterie est modélisé comme provenant de l'énergie photovoltaïque. Par ailleurs chaque kWh déchargé vient en remplacement d'un kWh issu de la production électrique fossile. La valeur d'un kWh chargé pendant la 2<sup>de</sup> vie est équivalent à la différence entre les facteurs d'émissions CO<sub>2</sub> d'un mode de production fossile d'une part, et les émissions d'un mode photovoltaïque d'autre part. Le rendement de la batterie qui fait que chaque kWh chargé n'est pas intégralement déchargé est pris en compte.

TABLEAU 24 : FACTEURS D'ÉMISSIONS UTILISÉS POUR L'APPROCHE MARGINALE DANS L'ANALYSE DE LA SECONDE VIE DES BATTERIES

FÉ marginal fossile	g CO <sub>2</sub> / kWh	200 à 400
FÉ du PV	g CO <sub>2</sub> / kWh	78

**L'approche par facteur d'émissions horaires moyens** : il s'agit d'un calcul de sollicitation optimisée de la batterie qui est très similaire au calcul de la charge optimum carbone de 1<sup>ère</sup> vie. La batterie se charge à l'heure où le mix électrique est le moins carboné en moyenne, et elle se décharge à l'heure où le mix est le plus carboné. Toujours en tenant compte du rendement de la batterie, cela permet de déterminer l'écart entre les émissions au moment de la décharge et les émissions au moment de la charge.

Pour l'approche marginale comme pour l'approche par facteur d'émissions horaires moyens, on suppose que l'impact (CO<sub>2</sub> ou autres indicateurs environnementaux) au moment de la charge se substitue à l'impact au moment de la décharge. Dit autrement, on raisonne comme si le kWh restitué au moment de la décharge permettait d'éviter la production d'un kWh à ce moment-là (on en évite les impacts), en considérant par contre les impacts du kWh lorsqu'il a été chargé. La différence des deux permet d'estimer un gain sur l'indicateur impact environnemental.

Les facteurs d'émissions des filières de production sont ceux qui ont été calculés dans le cadre de la démarche du référentiel PEBN (performance environnementale du bâtiment neuf), sur la base de facteurs d'émissions de la base EcoInvent.

## e) Limites liées à la modélisation des bénéfices liés à la seconde vie des batteries

Les principales limites sont les suivantes :

- Collecte de 100 % des batteries et des véhicules. Les données précises sur le taux de «perte» des batteries, qui ne seront pas collectées, n'ont pu être intégrées à temps dans la modélisation. Ce taux varie selon les sources disponibles, et peut être estimé à 5% en moyenne (confidentielles).
- Pas de prise en compte du reconditionnement des batteries en seconde vie : de même le reconditionnement des batteries n'a pas été pris en considération, par manque de données fiables disponibles. Selon les sources, le reconditionnement a une contribution au réchauffement climatique équivalente à une part allant de 5 et 50% du bilan global du véhicule sur l'ensemble de son cycle de vie.
- Pas de prise en compte des compétitions d'usage des batteries en fin de vie : les batteries en seconde vie pourront avoir des usages pluriels. Il a été choisi de mesurer un bénéfice potentiel. Cette réflexion sur la seconde vie ouvre un vaste champ de réflexion qui méritera d'être creusé par la suite. C'est la pertinence de ce champ de réflexion que les auteurs ont souhaité évaluer.

## 6.8. Fin de vie et recyclage

### a) Méthode

Pour le véhicule en dehors de sa batterie, les impacts de la fin de vie et les crédits de recyclage sont les mêmes entre 2016 et 2030. Pour les batteries, l'impact concernant la fin de vie des batteries des véhicules évolue selon deux logiques :

- entre 2016 et 2030 au prorata des masses des batteries électriques;
- selon une hypothèse sur l'évolution du taux de recyclabilité des matières. Cette hypothèse s'applique au prorata des impacts calculés. Si le taux de matières recyclées passe de 50% à 70% par exemple, on supposera que les impacts environnementaux évités par chaque kg de batterie seront multipliés par 1,4 (c'est-à-dire le rapport entre 70% et 50%).

### b) Facteurs influents d'ici 2030

Les hypothèses prospectives pour 2030 sur le taux de recyclabilité des matières incorporées dans les batteries prennent en compte 3 facteurs :

### La valeur intrinsèque des matières

Cobalt, nickel, manganèse, aluminium, cuivre... La valeur économique des matières premières sur les marchés lorsqu'elle est basse comme c'est le cas actuellement, ne favorise pas le recyclage (qui peut coûter plus cher que l'achat de matière première dans ce contexte). Le coût d'obtention d'une matière neuve pourrait augmenter dans les années à venir, avec la hausse de la demande. Néanmoins, l'évolution des marchés est marquée par l'incertitude. Un rééquilibrage des cours des matières premières constituerait un argument économique en faveur d'un recyclage accru.

### Les enjeux santé et environnement

Les préoccupations croissantes en termes de santé publique et de responsabilité des firmes peuvent jouer, de manière directe et indirecte, en faveur d'un renforcement de la réglementation sur le recyclage. Et ce d'autant plus que le nombre de batteries sur le marché, et leur masse, peuvent augmenter fortement.

- Santé : les batteries sont des produits contenant des formes dangereuses de composants, elles sont d'ores et déjà soumises aux réglementations européennes (REACH et sur le recyclage).
- Environnement et société : certains précurseurs de matériaux contenus dans les batteries, résultent de l'activité minière, qui peut avoir des impacts sur les territoires, l'environnement et les écosystèmes.
- 

### Le développement du marché du stockage de l'électricité

Les experts du groupe de pilotage ont estimé que le développement des énergies renouvelables dans le mix électrique européen, mais aussi l'essor des systèmes d'autoconsommation, pourront s'accompagner de la multiplication des besoins de stockage électrique. Poussé par la baisse des coûts, le développement d'un marché pour les batteries peut se traduire mécaniquement par un essor des volumes recyclables et des économies d'échelle. Cette situation pourrait améliorer la compétitivité de l'industrie du recyclage vis-à-vis des filières de production des matières premières.

### c) Hypothèses 2030

Deux paramètres restent inchangés par rapport à la situation actuelle :

- Le taux de collecte des batteries considéré ici est 100%.
- Pour les matériaux tels que le manganèse, le cobalt et le nickel, qui ont un impact non négligeable, ils sont recyclés en priorité en 2016.

Quand on augmente le taux de recyclabilité, ce sont les autres matières qui vont fortement augmenter : électronique, aluminium. C'est pourquoi l'augmentation du taux de recyclabilité en 2030 est « indicative » et ne donne aucune indication sur la nature des matières qui seront recyclées.

Le développement des filières de recyclage est un élément déterminant. Le choix des hypothèses sur les taux de recyclage prend en compte les facteurs exposés précédemment. Toutes les hypothèses vont dans le sens d'un maintien ou d'un accroissement des taux de recyclabilité des matériaux par rapport à 2016.

#### Hypothèse 1 : hypothèse basse

Taux de recyclabilité des matériaux : 50%.

Les politiques de transition se maintiennent sur les niveaux d'engagement actuels, ainsi la réglementation n'évolue pas. Le manque de changement substantiel dans les conditions économiques du recyclage participe au statu quo.

#### Hypothèse 2 : Hausse

Taux de recyclabilité des matériaux : 70%

La prise en compte par le législateur des enjeux environnementaux se traduit par le renforcement de la législation, en particulier sur les taux applicables aux différents matériaux.

#### Hypothèse 3 : scénario ambitieux

Taux de recyclabilité des matériaux : 85%

Le renforcement de la législation est important et instaure une meilleure prise en compte de l'économie circulaire et des ressources naturelles.

## 6.9. Hypothèses sur le parc de véhicules à 2030

Afin d'étudier les impacts et le potentiel d'un parc de véhicules électriques et hybrides rechargeables sur le système énergétique, trois hypothèses de composition du parc de véhicules électriques ont été prises en compte.

**Hypothèse basse :** les ventes de véhicules électriques ne décollent pas. L'objectif de 2 millions de véhicules (VE + VHR) n'est pas atteint et le nombre de véhicules électriques atteint 1,5 millions (dont une part limitée de véhicules 100% électriques - 500 000). Une part plus importante de VHR dans le parc reflète l'échec ou l'absence de politiques ambitieuses en ma-

tière de promotion du véhicule électrique. Cette pénétration est notamment le fruit d'un investissement limité dans les infrastructures publiques de recharge.

**Hypothèse intermédiaire :** une conversion soutenue du parc à l'électrique.

L'objectif de 4,4 millions retenu dans le scénario de référence, est atteint. Les VE sont majoritaires dans le parc par rapport aux VHR.

**Hypothèse haute :** un développement important des véhicules électriques.

Les politiques de soutien au déploiement du véhicule électrique sont maintenues et amplifiées jusqu'en 2030.

TABLEAU 25 : HYPOTHÈSES SUR LE NOMBRE DE BATTERIES EN SECONDE VIE

	2015	Scénario de référence « Loi de transition énergétique »	Scénario 1 « Ambition transition énergétique »	Scénario 2 « Accélération en faveur des énergies renouvelables »	Scénario 3 « Renoncement politique »
Nombre de véhicules électriques dans le stock (en million)	0,073	4,4	4,4	5,5	1,5
dont VE	0,065	0,5	1,9	2,2	0,5
dont VHR et VE-REX	0,008	1,5	2,5	2,2	1,5

## 6.10. Analyses de sensibilités pour la projection 2030

Une série d'analyses de sensibilité ont été réalisées, dont les résultats sont présentés dans les Chapitre 2 et 4 du rapport de résultats. Ces analyses sont réalisées pour tout ou partie des 5 indicateurs d'impacts considérés. Elles ont permis de conforter la construction des scénarios contrastés, à l'échelle d'un parc de plusieurs millions de véhicules, et en intégrant la fonction secondaire. Ces analyses permettent d'élargir le champ de l'étude initial, en testant une variation des paramètres de l'unité fonctionnelle (kilométrage et nombre de batteries), au cours de la vie du véhicule.

Le tableau ci-dessous récapitule les analyses réalisées.

TABLEAU 26 : LISTE DES SENSIBILITÉS ANALYSÉES		
Paramètre analysé	Indicateur(s) considéré(s)	
Évolution du mix énergétique en 2030	Les 5 indicateurs d'impacts	Cette analyse de sensibilité est réalisée à partir du mix moyen (et des 3 hypothèses principales pour 2030). Une analyse complémentaire est proposée à partir du facteur d'émission (g. CO <sub>2</sub> /kWh), y compris avec un facteur d'émission marginal (gaz).
Évolution des packs batteries	Les 5 indicateurs d'impacts	Cette analyse de sensibilité est réalisée à partir des 3 hypothèses d'évolution des batteries (variante de chimie et masse).
Évolution du taux de recyclabilité des matériaux (batteries)	Les 5 indicateurs d'impacts	Cette sensibilité s'appuie sur les 3 hypothèses.
Modification du nombre de batteries sur 10 ans	Pouvoir de réchauffement global	Ce calcul a pour but de montrer l'évolution des impacts des véhicules dans le cas où la batterie a une durée de vie moindre que 10 ans.
Modification du kilométrage	Pouvoir de réchauffement global	Ce calcul a pour but de montrer l'évolution des impacts dans le cas où le véhicule est utilisé de manière plus intensive. Lorsqu'il est cumulé à l'évolution de nombre de batteries.
Taux de pertes d'énergie pour la recharge ultra rapide	Pouvoir de réchauffement global	L'impact d'un taux de rendement de 70% pour les charges rapides est mesuré.
Évolution de la composition du parc électrique (variation en fonction du taux de VHR dans le parc électrique)	Les 5 indicateurs	La composition du parc induit une variation des impacts à cette échelle. Le taux de VHR est utilisé comme variante.
Nombre de batteries en seconde vie pour les services au système électrique	Pouvoir de réchauffement global	Ce calcul a pour but de montrer un potentiel haut de l'usage d'un stock de batteries en seconde vie pour les services au système électrique.

## 6.11. Limites à la modélisation prospective

La prospective 2030 s'appuie sur une analyse de cycle de vie attributionnelle, comme mentionnée en début de rapport. Les impacts indirects ne sont pas pris en compte, en particulier ceux liés à l'aménagement :

- des infrastructures routières;
- des infrastructures de recharge des véhicules électriques;
- réseaux intelligents;
- réseaux d'électricité.

La durée de la seconde vie a été définie de manière unique. 5 ans est une hypothèse conservatrice, une étude de sensibilité aurait permis de vérifier le degré d'influence de ce paramètre dans l'étude.

Les données disponibles sont limitées et les auteurs de l'étude assument cette limite. En revanche, ces limites mettent en lumière l'intérêt de poursuivre les réflexions et un travail collectif sur ces sujets.

# RÉSULTATS

Ce chapitre comprend quatre parties.

**La première partie présente les évolutions de l'empreinte environnementale des véhicules entre 2016 et 2030 au regard de chacun des 5 indicateurs considérés.** Cette évolution se situe dans le scénario de référence qui correspond à l'atteinte des objectifs fixés par la loi de transition énergétique, en particulier dans le contexte énergétique vers lequel tend la programmation pluriannuelle de l'énergie (39% d'énergies renouvelables dans le mix électrique). Les impacts sont exprimés à l'échelle des véhicules, puis d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques (c'est-à-dire des VE, VE-REX et VHR). Au sein de ce parc, 67% des véhicules sont des VHR et VE-REX.

**La seconde partie restitue l'évaluation des services rendus au système électrique par la fonction secondaire des batteries,** à savoir le stockage stationnaire d'électricité. L'étude a considéré :

- Les services au système électrique rendus par la batterie mobile en première vie (avec la charge bidirectionnelle -V2G- et en s'appuyant sur les systèmes de charge « intelligents » ;
- Les services potentiels rendus en seconde vie par la fonction de stockage stationnaire dans le bâtiment, en particulier pour soutenir les énergies intermittentes.

Cette partie intègre également les résultats d'une analyse spécifique réalisée sur l'indicateur « Pouvoir de réchauffement global ». Cela inclut l'impact environnemental consolidé qui comprend les services au système électrique en première vie et l'usage en seconde vie.

**La troisième partie est consacrée aux trois scénarios 2030, construits à l'échelle d'un parc de véhicules électriques.** Ces scénarios ont pour but d'explorer des voies d'optimisation de cette transition (scénario 1 et 2) ou, au contraire de mesurer les risques de l'échec des politiques publiques en faveur d'une mobilité durable (scénario 3). Les résultats comparés par scénario au regard des différents indicateurs, permettent de mesurer l'empreinte environnementale et d'évaluer les services potentiels pour le système électrique.

Finalement, **la quatrième partie fait état des analyses de sensibilité** réalisées pour les paramètres déterminants de la prospective 2030.

## *Remarques particulières*

Les véhicules sont distingués entre deux segments : les berlines et les citadines. Les résultats des deux gammes ne sont donc pas comparables entre elles car elles correspondent à des profils d'usage distincts (kilométrage et types de route empruntés).

En raison d'une masse largement supérieure, les résultats pour le véhicule SUV 4x4 ne sont pas comparables avec les autres berlines. Ce véhicule est intégré au rapport technique à titre d'exemple et est à considérer de manière isolée.

Les résultats de l'ACV sont exprimés de manière relative et ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie tels que le dépassement des seuils ni les risques associés à des écosystèmes particuliers.

# 1. ÉVOLUTION DES 5 INDICATEURS D'IMPACTS ENTRE 2016 ET 2030 DANS LE CADRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Sont présentés ici les impacts environnementaux de chaque véhicule au regard des 5 indicateurs de l'analyse de cycle de vie en 2016 et 2030.

Les valeurs 2016 sont issues de l'analyse de cycle de vie, les valeurs 2030 sont issues de l'exercice de projection 2030, dans le cas du scénario de référence « Loi de transition énergétique ». Pour rappel, ce scénario est fondé sur les objectifs stricts de la loi, et les tendances observées depuis plusieurs années. Il n'inclut pas d'utilisation du V2G, ni des batteries en seconde vie. Il est un point de référence.

Le détail des valeurs d'impact est fourni pour chaque indicateur en Annexe 4.

L'analyse présente par ailleurs les impacts à l'échelle d'un parc de véhicules électriques. Dans ce cas, un parc de 4,4 millions de véhicules électriques dont les deux tiers sont des véhicules hybrides rechargeables.

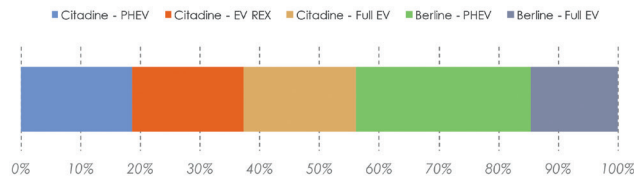
Sur l'ensemble des indicateurs d'impact par véhicule, le recyclage apparaît comme un des principaux leviers pour diminuer l'empreinte environnementale des véhicules électriques d'ici 2030 et au-delà.

A l'échelle du parc, l'empreinte agrégée des hybrides rechargeables (VHR) est importante. Cela s'explique en partie par le nombre plus important de VHR dans le scénario de référence (67% du parc).

TABLEAU 1 : RAPPEL DES CARACTÉRISTIQUES VÉHICULES ET DES PARAMÈTRES DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Caractéristiques des véhicules		
Durée de vie des véhicules et de la batterie	10 ans	
Kilométrage	150 000 km pour les citadines et 250 000 km pour les berlines	
Répartition des modes de roulage (thermique / électrique) pour les hybrides	50% / 50% en 2016 et 25% / 75% en 2030.	
Motorisation des véhicules thermiques en 2016 et 2030	En 2016 : Essence pour la citadine et diesel pour la berline En 2030, les VT sont des mild-hybrid.	
Paramètre	Variable (unité)	Scénario de référence : LTECV
1. Mix électrique	Part respective des différentes sources énergétiques (en %)	Mix Transition énergétique
2. Efficacité énergétique des modes de production (phase de fabrication)	Gains d'efficacité énergétique entre 2016 et 2030 = 2% (en %)	Oui
3. Consommation thermique des véhicules (phase d'usage)	Évolution de la consommation unitaire (en %)	Baisse de la consommation moyenne
4. Évolution des batteries	Masse et capacité batteries (en Kg et en Wh)	Croissance de l'efficacité énergétique
5. Recyclage	Taux de recyclabilité de la batterie (en %)	50%
6. Parc de VE-VHR	Nombre total de véhicules électriques dans le parc (en millions de véhicules)	4,4
7. Composition du parc	Part des véhicules hybrides (en %)	67%
8. Infrastructures	Taux d'accès à la prise en journée (en %)	50%

Figure 1 : Composition du parc 2030



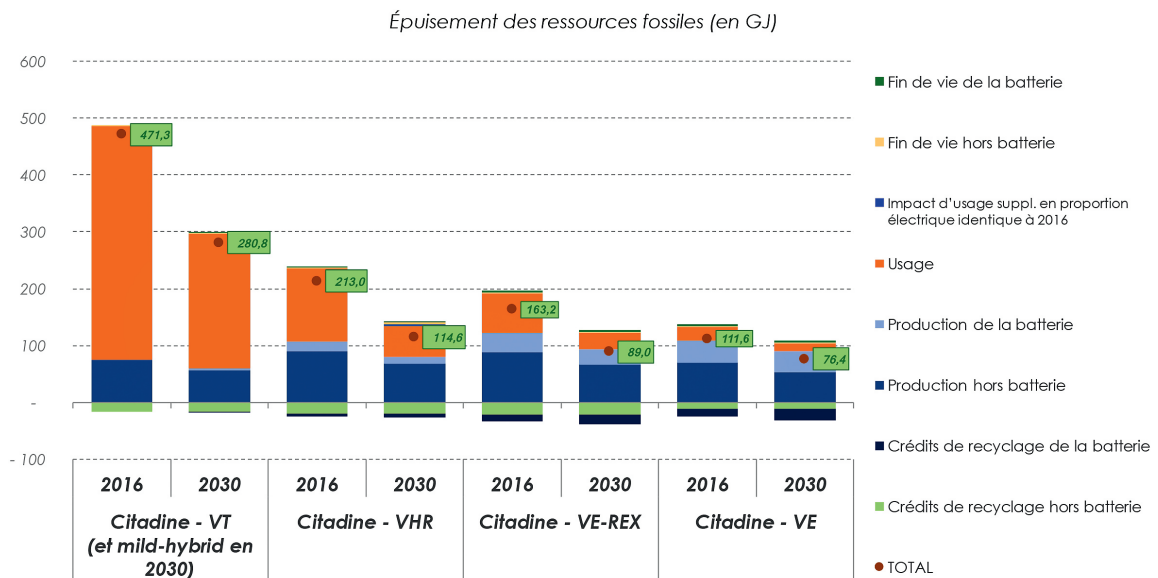
Dans le scénario de référence, le parc compte 4,4 millions de véhicules. Il est composé à 67% de véhicules hybrides. La répartition entre citadines et berlines est inchangée par rapport au parc actuel (sur la base des statistiques du CCFA – représentant des constructeurs français).

## 1.1. Déplétion abiotique / épuisement des ressources fossiles

### a. Evolution de la contribution des véhicules à l'épuisement des ressources fossiles entre 2016 et 2030

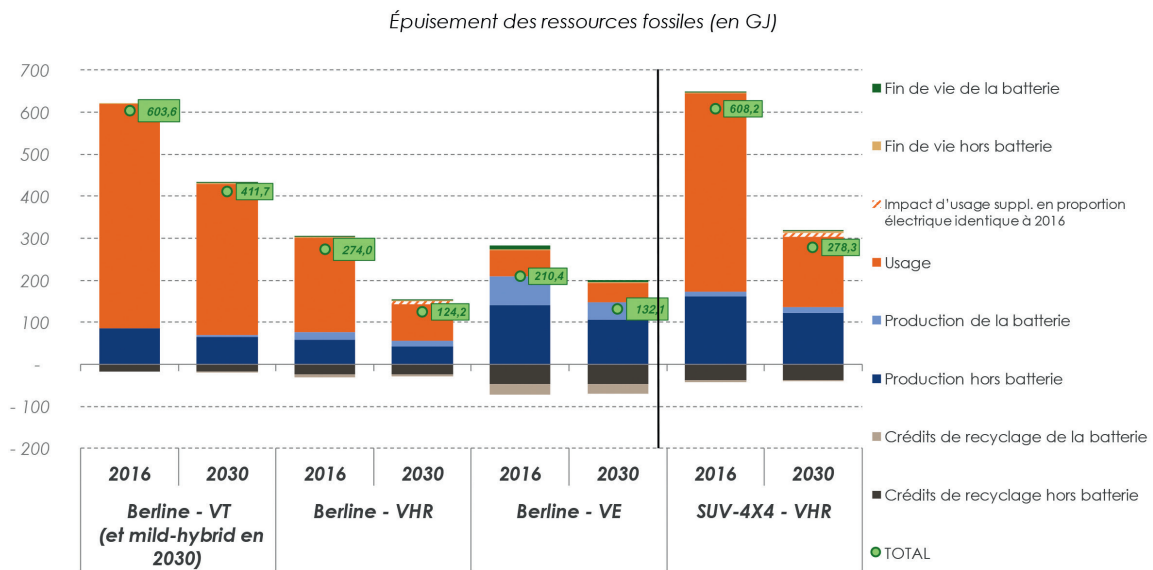
La consommation de ressources fossiles résulte majoritairement de la phase d'usage pour les véhicules thermiques (combustion de carburants) et de la phase de fabrication pour les véhicules électriques (VE, VHR et VE-REX). Pour ceux-ci, l'impact du « puit au réservoir » (well-to-tank) est limité par la faible teneur en énergies fossiles du mix électrique en France, en 2016 comme en 2030. C'est un avantage comparatif net à l'usage pour les véhicules électriques, par rapport à une motorisation thermique, qui se maintient en 2030.

Figure 2 : Consommation de ressources fossiles : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines



Sur l'ensemble du cycle de vie en 2030, la consommation de ressources fossiles varie de 1 à 3 entre les citadines électriques et thermiques et de 1 à 2 entre les berlines. Le SUV 4x4 est traité séparément du fait de sa masse importante comparée aux autres véhicules.

Figure 3 : Consommation de ressources fossiles : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines



En 2016, la contribution à l'épuisement des ressources fossiles des différents véhicules sur l'ensemble de leur cycle de vie (10 ans) varie entre 137 GJ<sup>26</sup> pour la citadine VE jusqu'à plus de 600 GJ pour une berline diesel, voire 649 GJ dans le cas d'un véhicule SUV 4x4 grand format (hors crédits de recyclages).

En 2030, la contribution à l'épuisement des ressources fossiles varie entre 122 GJ pour la citadine électrique et 432 GJ pour la berline thermique.

A titre de comparaison, la consommation de ressources fossiles sur une année d'un Européen moyen est de 61 GJ par an en 2016 (cf. Chapitre méthodologie<sup>27</sup>). Un véhicule électrique citadin en France représente donc 22% de cette empreinte annuelle européenne alors que l'impact d'une berline diesel génère quasi 100% de cet impact.

Dans le modèle, les baisses d'impact observées entre 2016 et 2030 s'expliquent par l'efficacité énergétique des véhicules thermiques. L'indicateur d'impact, rapporté à une année, pour la citadine thermique diminue de 40%, (de 47 GJ en 2016 à 28 GJ en 2030, crédits de recyclage inclus). La baisse d'impact qui résulte des progrès d'efficacité énergétique réalisés pendant la phase de fabrication des motorisations électriques (-15%) de 11,2 GJ à 9,5 GJ, est moins importante pour la citadine VE.

Dans l'analyse, les crédits de recyclage représentent 34% de l'impact d'une berline VE en 2016, et jusqu'à 39% en 2030 (pourcentages exprimés en fonction de

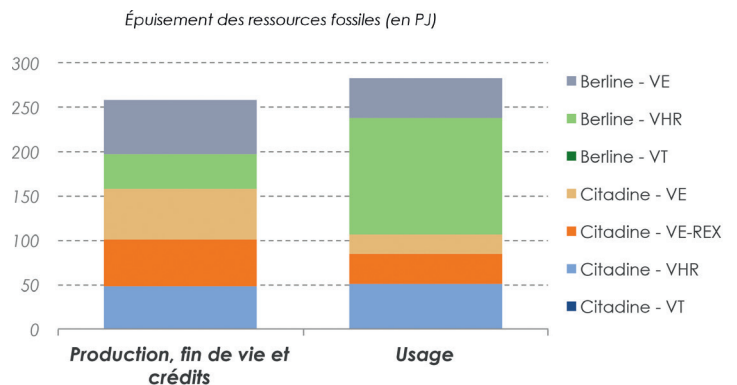
l'impact avec crédits). Pour la citadine VE, les crédits de recyclage en 2016 représentent environ 23% de l'impact total du véhicule et 28% de ce même impact en 2030.

### b. Contribution à l'épuisement des ressources fossiles d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques en 2030

L'impact d'un parc de véhicules électriques représente environ 540 PJ<sup>28</sup> sur l'ensemble de la durée de vie considérée (10 ans). Il se répartit de façon sensiblement équivalente entre la phase d'usage et les phases agrégées de production, de fin de vie et les crédits de recyclage.

Figure 4 : Contribution à l'épuisement des ressources fossiles d'un parc de 4,4 millions de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%, sur 10 ans - Estimation à 2030

#### Impact du parc électrifié, décomposé par véhicule



26 – 1 gigajoule (GJ) = 109 joules

27 – Les indications comparatives France n'ont pu être apportées ici, pas manque de disponibilité d'indicateur comparable à ceux utilisés dans l'ACV réalisée ici.

28 – 1 Petajoule (PJ) = 1015 joules.



## 1.2. Potentiel de réchauffement global

### a. Évolution du potentiel de réchauffement global entre 2016 et 2030

A l'usage, et principalement pour les véhicules thermiques et la part thermique des véhicules hybrides (VHR), l'amélioration de l'efficacité énergétique est un facteur déterminant de la baisse des émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 2016 et 2030.

Les émissions associées des VE et VE-REX sont principalement liées à la phase de fabrication (à 75%).

Les gains d'efficacité énergétique réalisés lors de la phase de production sont un facteur clé de la réduction de l'empreinte sur le climat d'ici à 2030. Ils permettent d'envisager une réduction de l'impact sur

cette phase de 25% en moyenne, en fonction des véhicules.

La baisse de la consommation des motorisations thermiques, liée à l'évolution des normes, explique la forte baisse des impacts à l'usage.

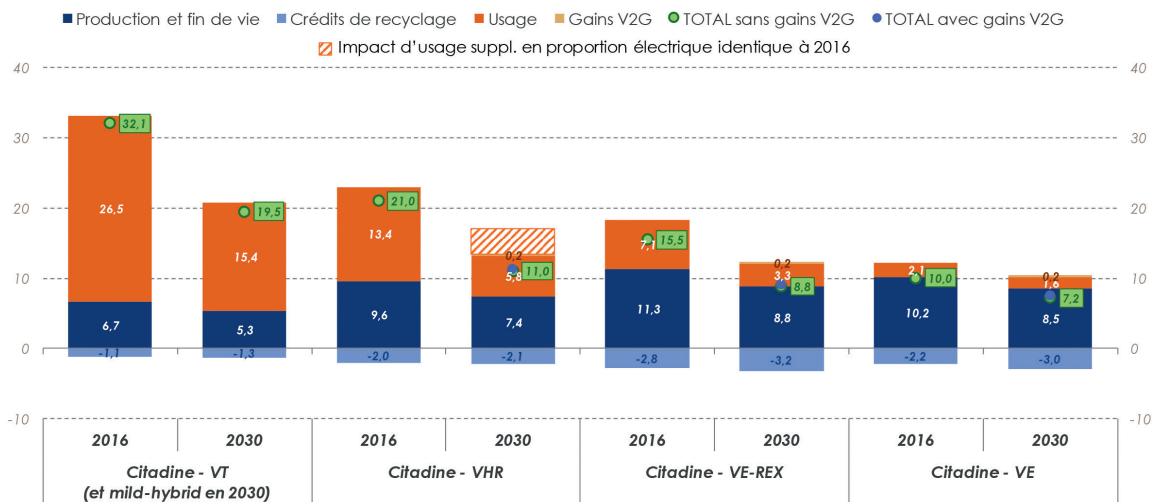
L'impact de la fabrication varie peu car les progrès d'efficacité énergétique sont contrebalancés par l'augmentation, même maîtrisée, des pack batteries. Pour les berlines électriques, on observe une légère baisse de l'impact liée à l'amélioration des procédés de fabrication en amont.

Figure 5 : Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines

#### Impact des citadines décomposé par phase et comparé entre 2016 et 2030

Potentiel de réchauffement global sur 100 ans (en t CO<sub>2</sub>-équiv.)

Pour le mix électrique 'PPE' en 2030



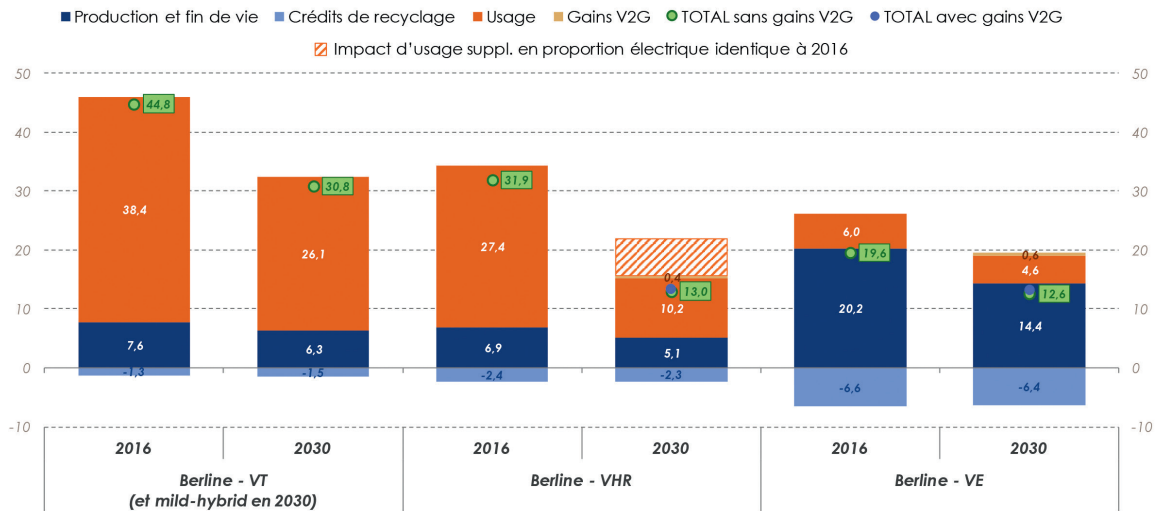
Comparativement, une citadine 100% électrique a un impact sur le climat 3 fois inférieur à celui d'un véhicule essence citadin et ceci même en tenant compte des émissions de la phase de production. Cet avantage se maintient en 2030, y compris en tenant compte d'une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules urbains essence.

Figure 6 : Contribution au changement climatique : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines

### Impact des berlines décomposé par phase et comparé entre 2016 et 2030

Potentiel de réchauffement global sur 100 ans (en t CO<sub>2</sub>-équiv.)

Pour le mix électrique 'PPE' en 2030



Comparativement, une berline électrique a un potentiel de réchauffement global inférieur de 40% à celui d'un véhicule diesel et ceux même en tenant compte des émissions de la phase de production. L'écart entre les véhicules se maintient en 2030, y compris en tenant compte de l'hybridation légère des véhicules diesel. Le bilan GES d'un VHR berline sur l'ensemble de son cycle de vie est moindre que celui d'un véhicule diesel, si les automobilistes utilisent le mode électrique. Il est à noter que le bilan carbone sera particulièrement sensible aux usages des conducteurs. Dans l'analyse, la faible contribution au changement climatique du VHR s'explique notamment par des émissions associées relativement faibles lors de la production et par les hypothèses sur les ratios d'utilisation du mode électrique en phase d'usage [50% en 2016 et 75% en 2030, cf. Partie 6.4.a du rapport méthodologique].

Sur cet indicateur, les crédits de recyclage représentent entre 5 et 34% de la contribution au changement climatique des véhicules électriques (VE, VE-REX et VHR) en 2016, et près de 40% en 2030 pour la berline VE.

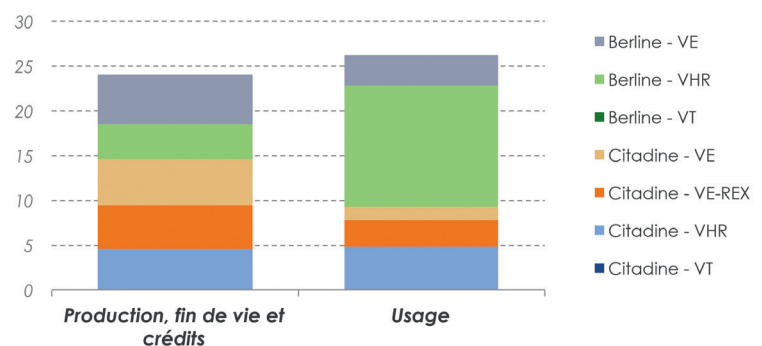
### b. Contribution au changement climatique d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques en 2030

L'empreinte climat d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques sur une durée de 10 ans s'élève à 50 MtCO<sub>2</sub>e en 2030. Les impacts sur l'ensemble du cycle de vie sont relativement équivalents entre la phase d'usage et les autres phases cumulées.

Figure 7 : Contribution au changement climatique d'un parc de 4,4 millions de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%- estimation 2030

### Impact du parc électrifié, décomposé par véhicule

Potentiel de réchauffement global sur 100 ans (en Mt CO<sub>2</sub>-équiv.)



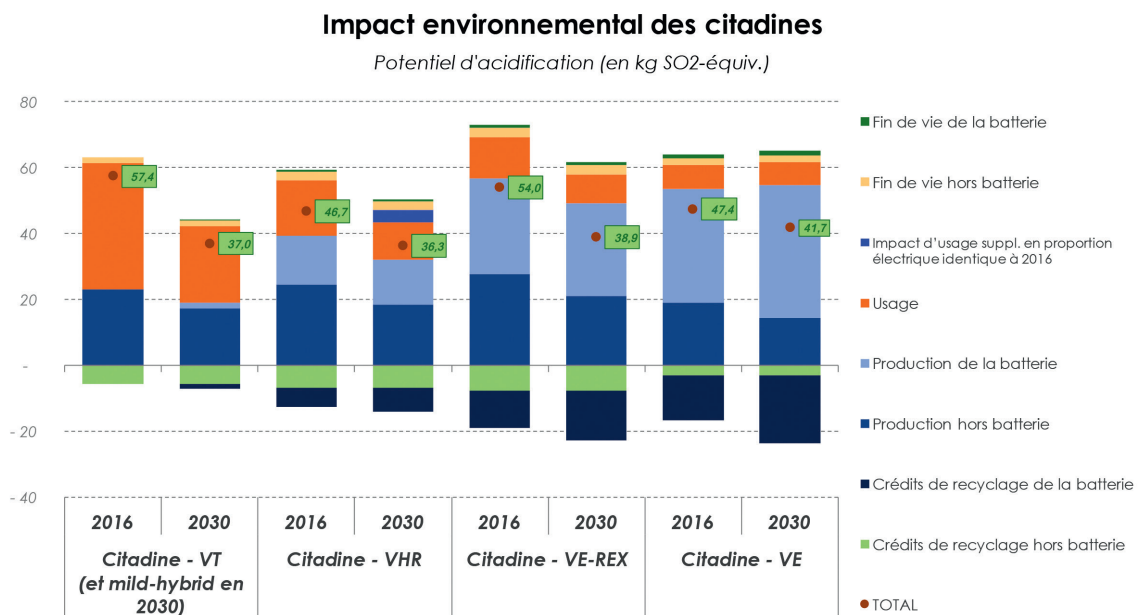
## 1.3. Potentiel d'acidification des écosystèmes

### a. Évolution du potentiel d'acidification des écosystèmes des véhicules entre 2016 et 2030

Le potentiel d'acidification de la phase de production s'accroît avec le degré d'électrification du véhicule. Il est en effet lié essentiellement à la batterie de traction (plus de 50% du potentiel pour les véhicules électriques en général, voire 80% pour les VE). Le lien est fort entre la masse de la batterie et sa chimie d'une part, et le potentiel d'acidification d'autre part. L'énergie consommée lors de l'extraction des matériaux cobalt, lithium, nickel est un facteur important sur

cet indicateur. Le potentiel d'acidification est dû notamment aux émissions d'oxydes d'azote (NOx). Bien que le VE (et dans une moindre mesure le VE-REX) n'émette pas de NOx à l'échappement, les activités liées à la production du véhicule et de ses composants peuvent quant à elles générer des particules polluantes, qui sont comptabilisées ici dans le potentiel d'acidification des écosystèmes.

Figure 8 : Potentiel d'acidification : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines



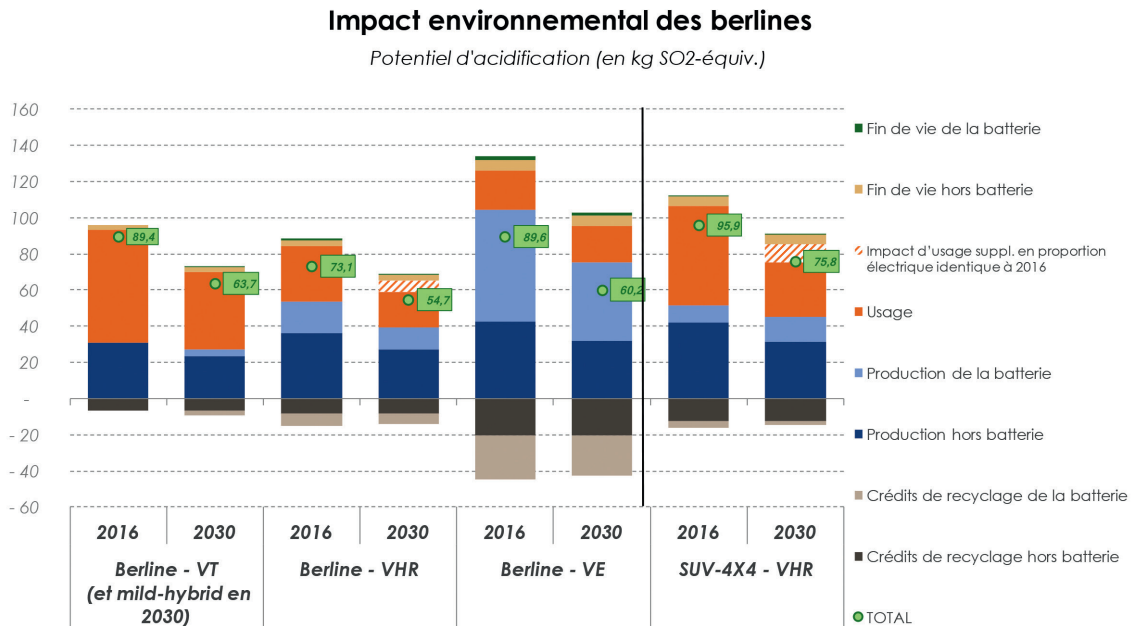
L'indicateur d'impact de la citadine VE est sensiblement le même entre 2016 et 2030, avec une légère hausse de 2%. En effet, la capacité et la masse des batteries des citadines VE augmentent dans les hypothèses, de pair avec une quantité de matière extraite plus importante.

L'indicateur d'impact 2030 des berlines est en baisse par rapport à 2016 pour tous les véhicules. L'impact de la berline thermique diminue de 24% et celui de la berline VE de 23%. Ces pourcentages sont exprimés sans tenir compte des crédits de recyclage. L'évolution différenciée entre les gammes s'explique par les compositions hétérogènes des packs batteries (selon les variantes de chimies).

En 2016, le potentiel d'acidification varie entre 59 et 134 kg SO<sub>2</sub>-eq. sur les 8 véhicules (hors crédit de recyclage). A titre comparatif, le potentiel d'acidification actuel d'un Européen moyen est estimé à 55 kg SO<sub>2</sub>-eq. par an en 2016. Les véhicules électriques en France représentent donc entre 11% (VHR citadine) et 24% (berline VE) de ce potentiel annuel moyen.

En 2016, les crédits de recyclage représentent 35% de l'évolution de l'impact de la citadine VE et 50% de la berline VE. La contribution positive des crédits est à peu près équivalente entre 2016 et 2030.

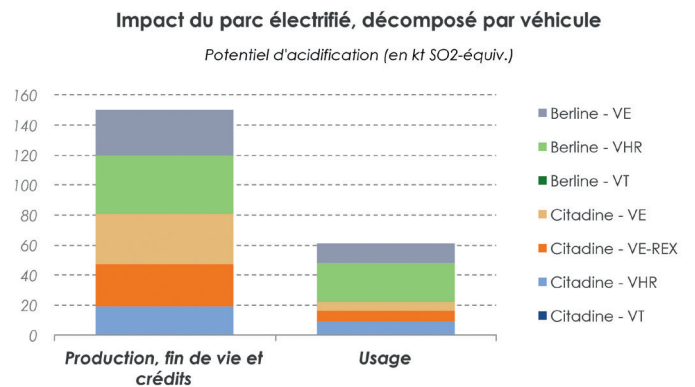
Figure 9 : Potentiel d'acidification : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines



#### b. Potentiel d'acidification estimé d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques en 2030

L'impact à l'échelle du parc, de l'ordre de 210 kg SO<sub>2</sub>-eq. sur la durée de vie des véhicules, est principalement dû à la phase de production des véhicules et de leurs batteries (près de 70%). La phase d'usage a un impact limité, du fait de l'absence d'émissions à l'échappement. Le potentiel d'acidification à l'usage est donc lié à la consommation d'électricité, et à la nature du mix électrique.

Figure 10: Potentiel d'acidification d'un parc de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%



L'impact de la phase de production varie peu entre les différents véhicules. En effet, bien que les citadines aient des capacités moins importantes que celles des berlines, les densités énergétiques de leur batterie sont inférieures. Ceci limite l'effet de la différence de masse des batteries entre les deux segments. Par ailleurs, l'impact environnemental par kg de batterie est moindre pour la chimie des berlines que pour celle des citadines, ce qui tend également à réduire la différence d'impact entre les gammes de véhicules.

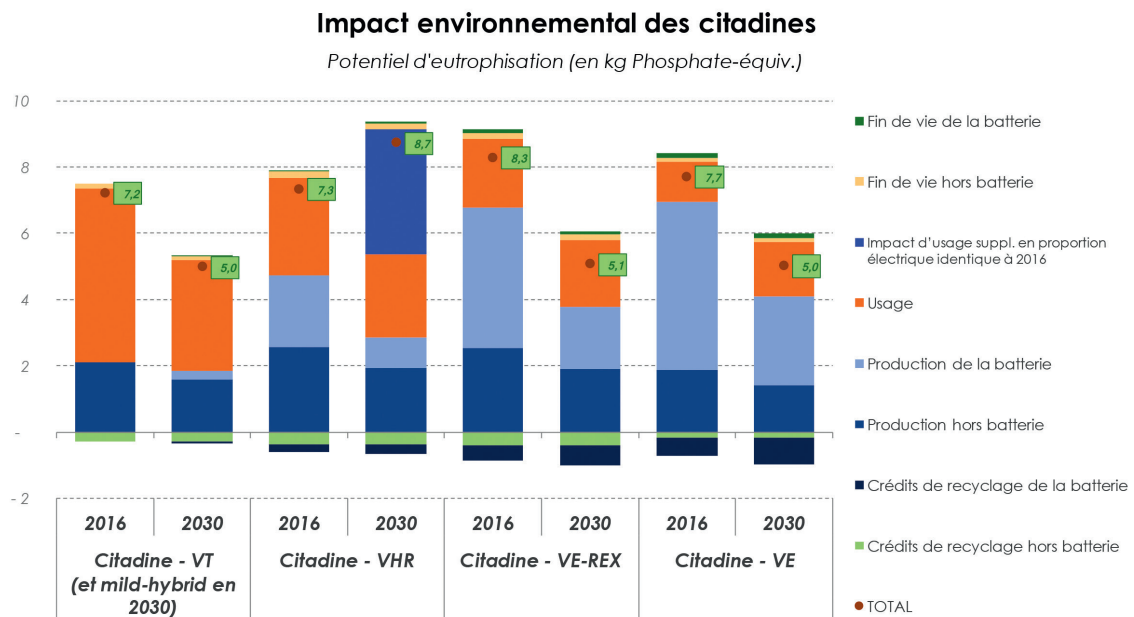
## 1.4. Potentiel d'eutrophisation

De même que pour le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation s'accroît avec le degré d'électrification du véhicule. En cause, la fabrication de la batterie, l'extraction et le traitement des matériaux.

Les véhicules thermiques se distinguent par un impact plus marqué en phase d'usage, les motorisations électriques par un impact plus lourd à la fabrication.

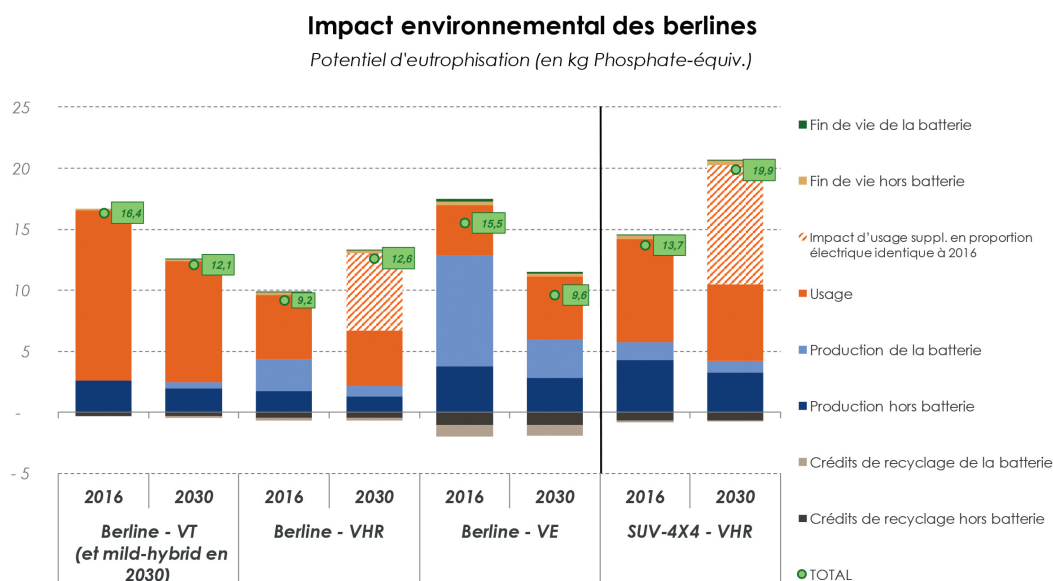
### a. Evolution du potentiel d'eutrophisation des véhicules entre 2016 et 2030

Figure 11 : Potentiel d'eutrophisation : résultats 2016-2030 comparés pour le segment des citadines



D'ici à 2030, l'indicateur d'impact diminue de manière significative, de 25% en moyenne pour les différents véhicules. Cette baisse est principalement liée à l'évolution des modes de production des batteries pour les véhicules électriques, et à la baisse de la consommation thermique pour les VT.

Figure 12 : Potentiel d'eutrophisation : résultats 2016-2030 comparés pour le segment des berlines



En 2016, le potentiel d'eutrophisation sur l'ensemble du cycle de vie varie de 7,5 kg PO<sub>4</sub>-eq. pour la citadine VE à 17,5 kg PO<sub>4</sub>-eq. pour la berline VE (hors crédits de recyclage). À titre de comparaison, le potentiel d'eutrophisation, ramené à l'échelle d'un habitant en Europe, est estimé à 26 kg PO<sub>4</sub>-eq. par an (cf. Chapitre Méthodologie). Les véhicules électriques utilisés en France contribuent à une part comprise entre 2,9% et 6,9% du potentiel d'eutrophisation d'un citoyen européen moyen sur une année.

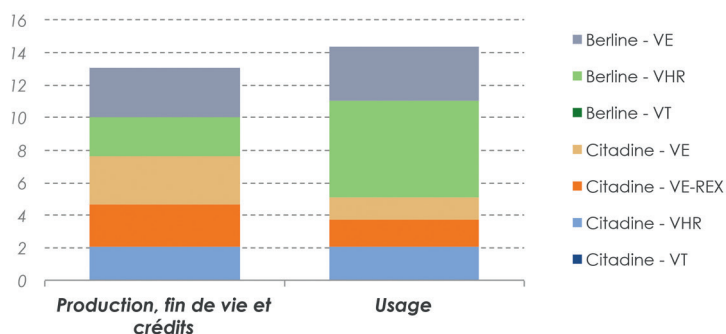
### b. Potentiel d'eutrophisation estimé d'un parc de 4,4 millions de véhicules en 2030

Le parc électrique représente près de 27 kt PO<sub>4</sub>-eq. sur la durée de vie des véhicules. Les impacts de la phase d'usage et des autres phases (principalement fabrication des véhicules et des batteries) sont relativement équivalents.

Figure 13 : Impact de potentiel d'eutrophisation d'un parc de 4,4 millions de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%, sur 10 ans – estimation 2030

### Impact du parc électrifié, décomposé par véhicule

Potentiel d'eutrophisation (en kt Phosphate-équiv.)



## 1.5. Potentiel de création d'ozone photochimique

Le potentiel de création d'ozone photochimique de la seule production des batteries représente environ 30% de l'impact total de la berline VE en 2016 et 36% de celui de la citadine VE. L'impact de la batterie évolue de manière différente en fonction des véhicules à l'horizon 2030. Il baisse pour la berline et augmente pour la citadine électrique. Cela s'explique par l'évolution différenciée des caractéristiques des batteries. Le potentiel de création d'ozone photochimique est en effet directement lié à la batterie et est sensible aux variations de capacités et de masse des packs.

### a. Evolution du potentiel de création d'ozone photochimique des véhicules entre 2016 et 2030

L'impact des VT est principalement dû à la phase d'usage, avec des évolutions importantes entre 2016 et 2030. Ainsi la citadine essence voit l'impact de sa phase d'usage baisser de 40% en 2030, grâce à l'amélioration de sa consommation unitaire. Malgré cette amélioration, l'impact de la citadine essence reste supérieur à celui des véhicules électriques en 2016 et

en 2030. Pour le VHR, l'impact de la phase d'usage évolue également par le double effet de l'amélioration de la consommation en mode thermique d'une part et de l'accroissement de la fraction des kilomètres effectués en mode électrique d'autres part.

Figure 14 : potentiel de création d'ozone photochimique : résultats 2016-2030 comparés pour le segment des citadines

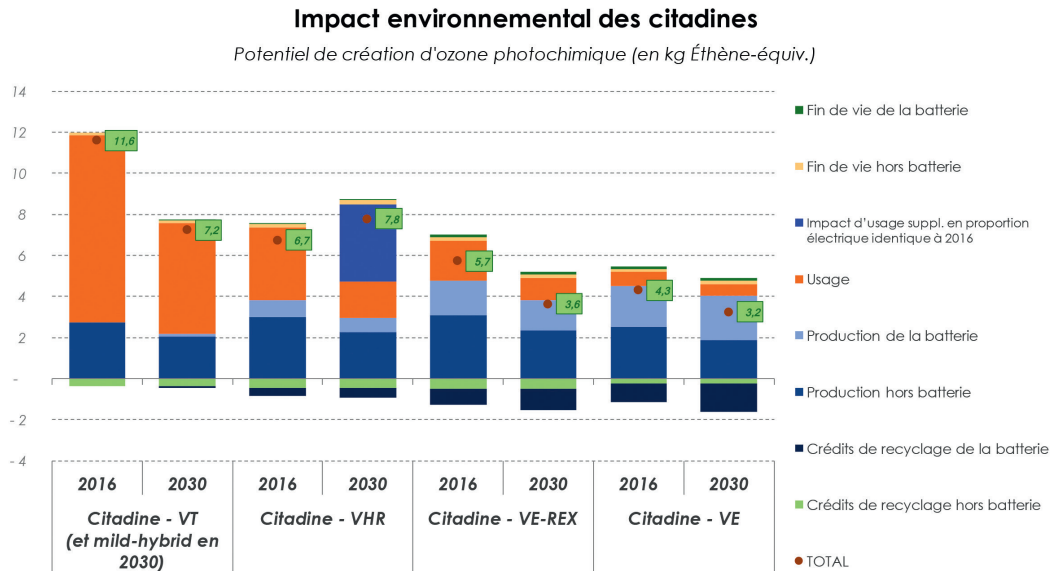
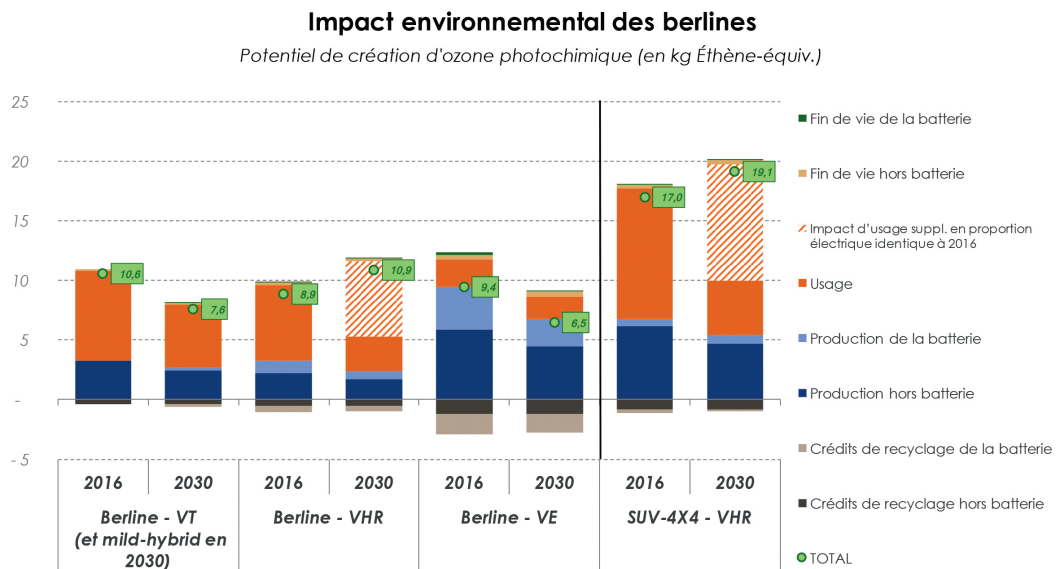


Figure 15 : Impact de potentiel de création d'ozone photochimique d'un parc de 4,4 millions de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%, sur 10 ans – estimation 2030



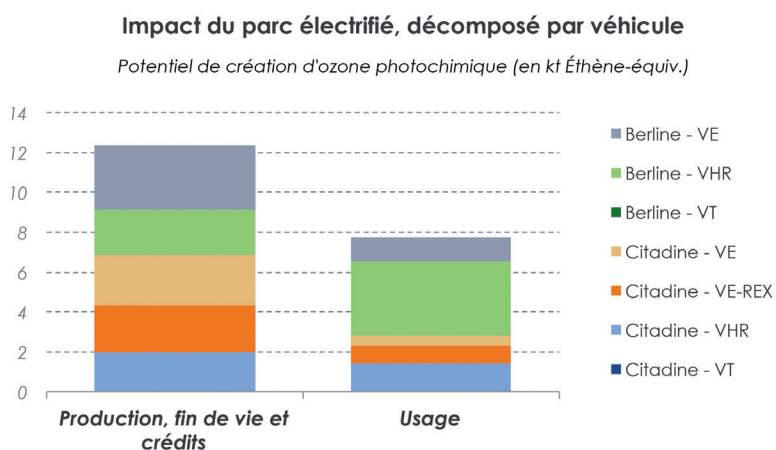
En 2030, l'impact diminue pour les véhicules thermiques [-36% pour la citadine, -26% pour la berline], les VHR [-35% pour la citadine, -44% pour le berline] le VE-REX [-26%], et dans une moindre mesure pour la citadine VE [-11%] et la berline VE [-25%].

L'impact des véhicules en 2016 varie de 5,5 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq. à 18,1 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq. hors crédits. Le potentiel de création d'ozone photochimique en Europe est estimé à 17 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq. par an par habitant. Soit une contribution des véhicules électriques utilisés en France de 3 à 11% du potentiel moyen de création d'ozone photochimique par habitant. L'électrification d'une partie du parc automobile en France est susceptible d'augmenter la part relative de la mobilité dans le potentiel de création d'ozone photochimique d'un habitant moyen.

## b. Potentiel de création d'ozone photochimique d'un parc de 4,4 millions de véhicules en 2030

Pour le parc de véhicules électriques, l'impact environnemental est de 20 kt C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq. L'impact de la phase de production du parc électrique représente 2/3 de l'impact total.

Figure 16 : Impact de potentiel de création d'ozone photochimique d'un parc de 4,4 millions de VE, VHR et VE-REX, avec un taux de VHR et VE-REX dans le parc à 67%, sur 10 ans – estimation 2030



**TABLEAU 2 : EVOLUTION DES IMPACTS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES EN COMPARAISON AVEC LES VÉHICULES THERMIQUES EN 2016/ MILD HYBRID EN 2030**

Citadine / essence		VHR	VE EX	VE
Épuisement des ressources fossiles	2016	-51%	-60%	-72%
	2030	-52%	-54%	-59%
Pouvoir de réchauffement global	2016	-30%	-45%	-63%
	2030	-36%	-49%	-50%
Potentiel d'acidification	2016	-4%	16%	-
	2030	8%	41%	46%
Potentiel d'eutrophisation	2016	5%	18%	12%
	2030	10%	9%	71%
Création d'ozone photochimique	2016	-36%	-38%	-48%
	2030	-22%	-31%	3%
Berlines / diesel		VHR	VE	SUV-4X4
Épuisement des ressources fossiles	2016	-51%	-55%	5%
	2030	-43%	-48%	-25%
Pouvoir de réchauffement global	2016	-25%	-43%	22%
	2030	-52%	-40%	-25%
Potentiel d'acidification	2016	-7%	41%	18%
	2030	-12%	44%	14%
Potentiel d'eutrophisation	2016	-42%	-	-13%
	2030	10%	17%	-52%
Création d'ozone photochimique	2016	-19%	12%	48%
	2030	-1%	51%	-43%

Ces résultats sont ceux du scénario de référence, dans le cas où la France atteint les objectifs de la loi de transition énergétique.

Le tableau se lit de la manière suivante : en 2016, une citadine VHR a une consommation de ressources fossiles de 51% inférieure à la consommation d'un VT (essence). En 2030, un SUV -4X4 a un potentiel d'acidification de 18% supérieur à celui d'un mild-hybrid (diesel). L'ensemble des valeurs d'impacts est présenté en Annexe 4.



## 2. ÉVALUATION DU POTENTIEL DE SERVICES AU SYSTÈME ÉLECTRIQUE OFFERT PAR LES BATTERIES EN PREMIÈRE ET SECONDE VIE EN 2030

### 2.1. Méthode

Ce chapitre présente la contribution au changement climatique de cinq véhicules électriques, en introduisant les effets de la charge optimum carbone et de la charge bidirectionnelle (V2G). Dans le cas de l'évaluation des services au système électrique, les véhicules ne se chargent pas nécessairement dès qu'ils se connectent à une infrastructure le permettant, comme c'est le cas lors de la « charge naturelle ».

Cette évaluation est réalisée à partir du scénario 1, Ambition transition énergétique, qui inclut un taux d'accès à la prise en journée de 50% en 2030. Les infrastructures accessibles sont situées sur le lieu de travail, sur la voie publique, ou encore en zones non résidentielles (zones commerciales etc.). Le mix électrique de 2030 correspond au mix énergétique pris en compte par la programmation pluriannuelle de l'énergie 2016 (PPE).

Les gains sont représentés en trois catégories :

- **Les gains en première vie** issus de la charge pilotée dite « optimum carbone ». Ils sont obtenus en décalant la charge des véhicules pour que celle-ci ait lieu au moment où la production de l'électricité est la moins carbonée par unité d'énergie rechargée. Dans la modélisation, cela est permis pour la plupart des charges effectuées par les véhicules, sauf celles qui ont lieu pendant les trajets de longue distance, qui obéissent à une contrainte particulière pour la recharge des véhicules. Sur les représentations graphiques, les gains sont évalués dans le cas où 100% des véhicules pourraient effectuer de telles charges.
- **Les gains de l'usage du V2G en première vie.** Ces gains sont présentés dans le cas où 100% des charges normales sont des charges V2G réalisées lors de « l'optimum carbone », hors journées de trajets de longue distance. En soutirant de l'électricité quand elle est faiblement carbonée pour la réinjecter au moment où la production est le plus carboné, le V2G permet un gain supplémentaire au seul pilotage de la charge.

- **Les gains en seconde vie.** Lorsque les batteries des véhicules ont perdu 1/5 de leur capacité initiale, elles peuvent être utilisées comme moyen de stockage stationnaire. En stockant de l'énergie d'origine renouvelable et en réinjectant cette énergie au moment où le mix est le plus carboné, les émissions évitées de CO<sub>2</sub> peuvent être associées à des gains à l'échelle d'un véhicule ou d'un parc de véhicules (cf. Chapitre Méthodologie Partie 6.7).

### 2.2. Résultats par véhicule

#### a. Estimation des gisements de gains dans le scénario 1.

Les gains en première vie sont substantiels pour l'ensemble des véhicules électriques et hybrides rechargeables, mais sont plus importants pour les VE. Ils peuvent représenter jusqu'à 20% de l'impact des véhicules 2030 (en tenant compte des crédits de recyclage), comme c'est le cas pour la citadine électrique. Les gains de la VE-REX sont légèrement moins importants, de l'ordre de 16%, et d'environ 10% pour les deux VHR.

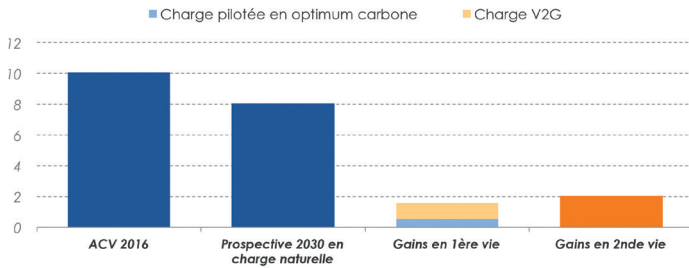
Pour chaque véhicule, la charge « optimum carbone » et le V2G permettent des gains relativement équivalents. Ces gains correspondent à des « potentiels maximaux » : c'est à dire si 100% des charges sont pilotables ou bidirectionnelles pour la première vie, et si la batterie en seconde vie est utilisée au quotidien (voir Chapitre Méthodologie, Partie 6).

La figure ci-dessous présente la contribution au réchauffement global des 5 véhicules électriques et hybrides rechargeables en 2016 et 2030 en charge naturelle, ainsi que les gisements de gains, en première vie et en seconde vie.

Figure 17 : Gisement des gains pour 5 véhicules électriques en première vie

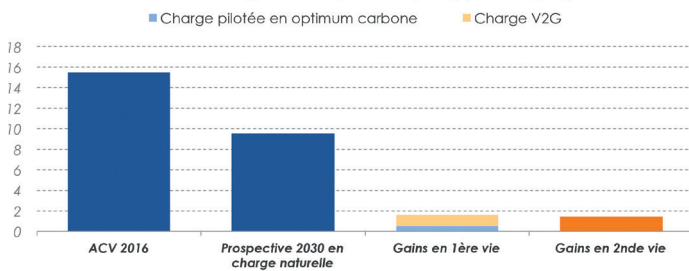
### Gisements de gains pour la Citadine - VE

Global Warming Potential (GWP 100 years) [t CO<sub>2</sub>-Equiv.]



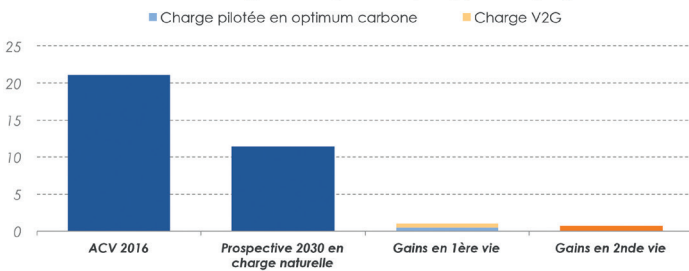
### Gisements de gains pour la Citadine - VE-REX

Global Warming Potential (GWP 100 years) [t CO<sub>2</sub>-Equiv.]



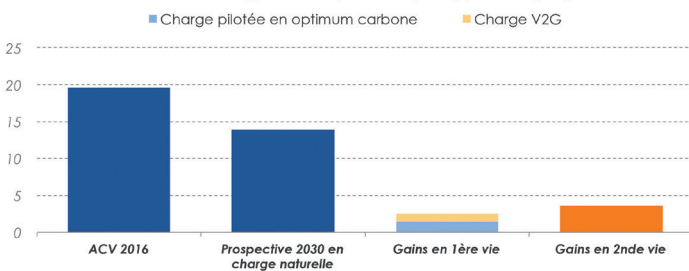
### Gisements de gains pour la Citadine - VHR

Global Warming Potential (GWP 100 years) [t CO<sub>2</sub>-Equiv.]



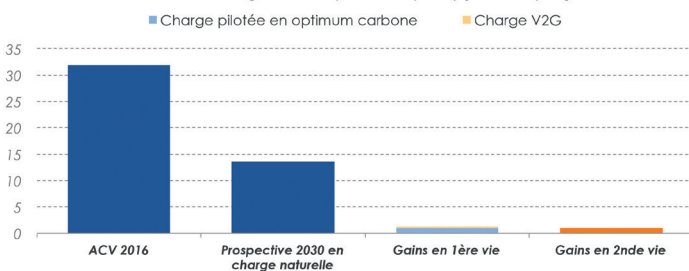
### Gisements de gains pour la Berline - VE

Global Warming Potential (GWP 100 years) [t CO<sub>2</sub>-Equiv.]



### Gisements de gains pour la Berline - VHR

Global Warming Potential (GWP 100 years) [t CO<sub>2</sub>-Equiv.]



Les gains sont exprimés de façon « positive » : c'est-à-dire que s'ils correspondent à un évitement des émissions de CO<sub>2</sub>, ils sont comptés en termes positifs.

Les gains ne se déduisent pas des impacts, chacun relevant de deux fonctions différentes : la mobilité d'une part et le stockage d'autre part. Cette représentation, sur un même graphique pour 2016 et 2030, permet d'apprécier les gains de manière quantitative et d'illustrer la part relative des impacts et des gains sur l'ensemble des fonctions du véhicule et de sa batterie.

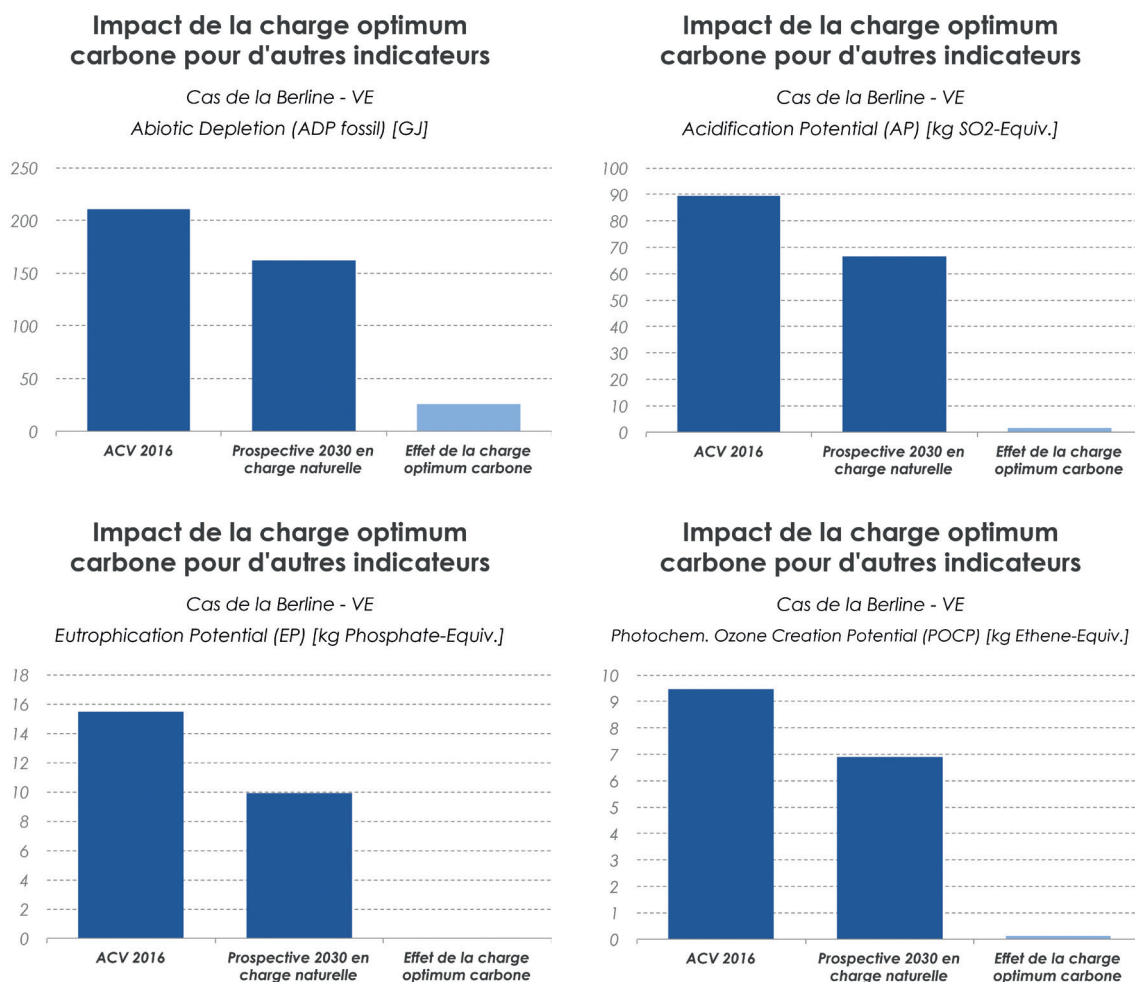
A titre illustratif, en agrégeant première et seconde vie, les gains potentiels sont importants. Pour les VE ils peuvent s'élever à plus de 5 tCO<sub>2</sub>-eq., ce qui correspond à près de 45% de l'impact prospectif 2030 en charge naturelle. Pour le VE-REX les gains cumulés s'élevaient à 30%, et de 15 à 17% pour les VHR. Considérés de manière isolée, les gains en seconde vie sont significatifs au regard de l'impact des véhicules en première vie. Environ 1 tCO<sub>2</sub>-eq. pour les VHR et VE-REX, 2 tCO<sub>2</sub>-eq pour la citadine VE et plus de 3 tCO<sub>2</sub>-eq. pour la berline VE.

## b. Estimation de résultats pour les autres indicateurs

La charge « optimum carbone » a un impact limité sur les indicateurs environnementaux autres que le potentiel de réchauffement global. Sur les quatre indicateurs environnementaux concernés, les effets sont en-deçà du seuil significatif (inférieurs à 5% de l'impact en 2030 des véhicules).

Dans la figure ci-dessous, les impacts de la charge « optimum carbone » pour la citadine VE sont représentés pour les quatre indicateurs environnementaux, autres que le pouvoir de réchauffement global, de façon positive (gain) et dans le cas où 100% du gisement de charge pilotée serait atteint.

Figure 18 : Impact de la charge optimum carbone sur les indicateurs hors pouvoir de réchauffement global.



On constate que seul l'impact sur la consommation de ressources fossiles est significatif. Cela s'explique par le fait que cet indicateur est directement lié au contenu carbone. Sur les autres indicateurs, l'impact est négligeable.

### c. Potentiel des charges pilotées / optimum carbone : résultats comparés

L'empreinte environnementale des véhicules a été mesurée en prenant en compte trois mix électriques différents (cf. Chapitre Méthodologie - Partie 6.7), et en évaluant à chaque fois le potentiel des charges pilotées, optimum carbone et V2G.

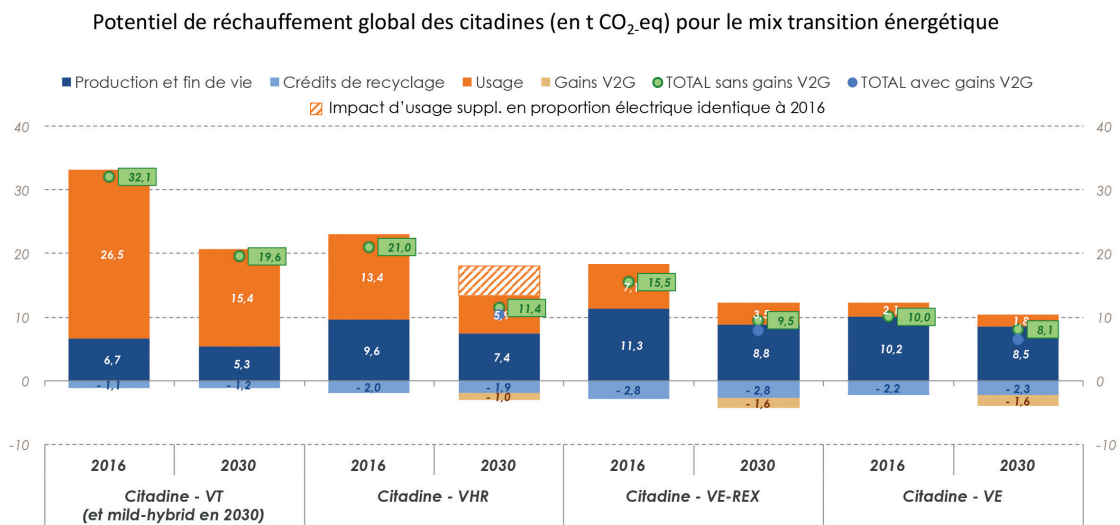
Dans le cas où les objectifs de la transition énergétique ne sont pas atteints, ce qui se traduit par un mix plus carboné, l'impact des véhicules électriques sur le pouvoir de réchauffement global est plus lourd. Plus le mix énergétique sera décarboné, notamment à partir d'ENR, plus l'impact sur cet indicateur sera

faible. Cette observation confirme la sensibilité de l'empreinte carbone des véhicules électriques à l'évolution du mix électrique (cf. Partie 4.1).

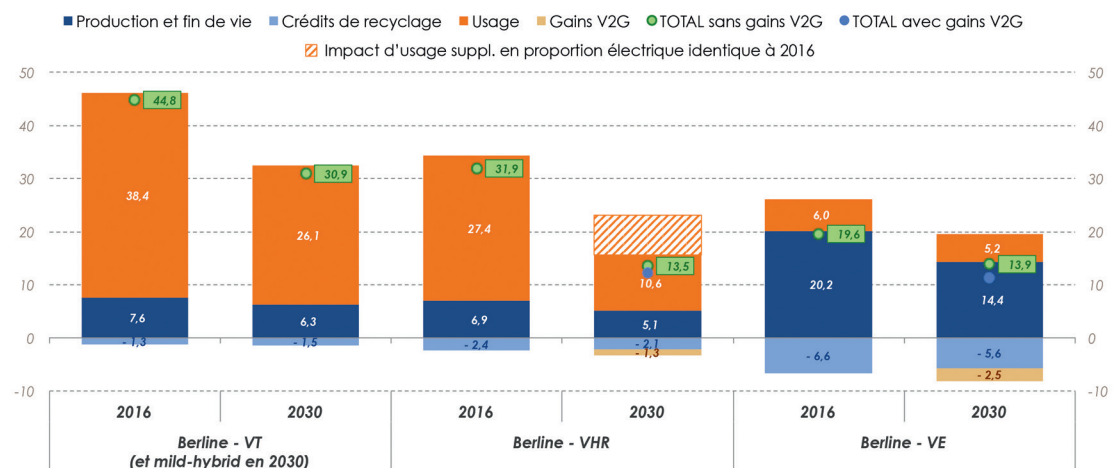
Les figures suivantes présentent les impacts des différents véhicules par phase ainsi que les gains potentiels du V2G. Dans ce cas, 100% des charges normales sont des charges V2G (hors journées de trajets de longue distance).

- Les gains permis par le V2G sont présentés distinctement de la phase d'usage, et avec un signe négatif comme les crédits de recyclage.
- L'impact de la phase d'usage représenté correspond à l'impact en cas de charges naturelles.
- Le point vert correspond à l'impact algébrique total hors gains V2G, c'est-à-dire la somme des contributions positives à l'impact sur les différentes phases. Les crédits de recyclage sont directement déduits mais pas les gains V2G.
- Le point bleu correspond l'impact algébrique total, en intégrant les gains permis par le V2G.

Figure 19: Contribution au réchauffement global 2016-2030 intégrant les services aux systèmes électriques/ résultats dans le cas du Mix Transition énergétique (39%ENR) en 2030



Potentiel de réchauffement global des citadines (en t CO<sub>2</sub>eq) pour le mix transition énergétique



Comparativement et selon toutes les hypothèses de mix électrique, une citadine électrique a un potentiel de réchauffement global inférieur à celui d'une citadine essence, y compris en tenant compte des émissions de la phase de production. Cet avantage se maintient en 2030, y compris en tenant compte de l'hybridation légère des véhicules diesel et de la baisse de consommation des moteurs thermiques [40% de réduction d'émission].

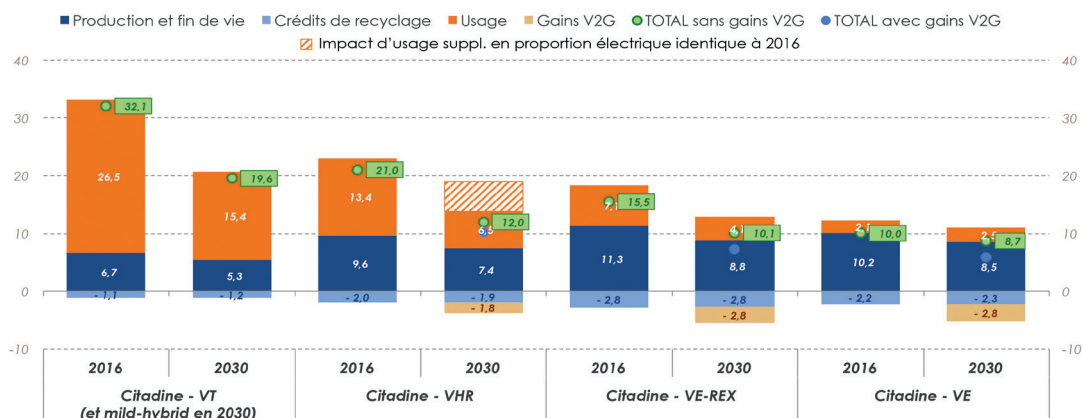
De la même manière et selon toutes les hypothèses de mix électrique, une berline électrique de 2016 a un impact inférieur sur le pouvoir de réchauffement global par rapport à celui d'une berline diesel, y compris en tenant compte des émissions de la phase de

production. Même si l'écart se resserre grâce à l'hybridation légère des véhicules diesel, cet avantage se maintient en 2030. La part importante des crédits de recyclage permet ici de prendre la mesure de l'étape de fin de vie pour réduire l'empreinte.

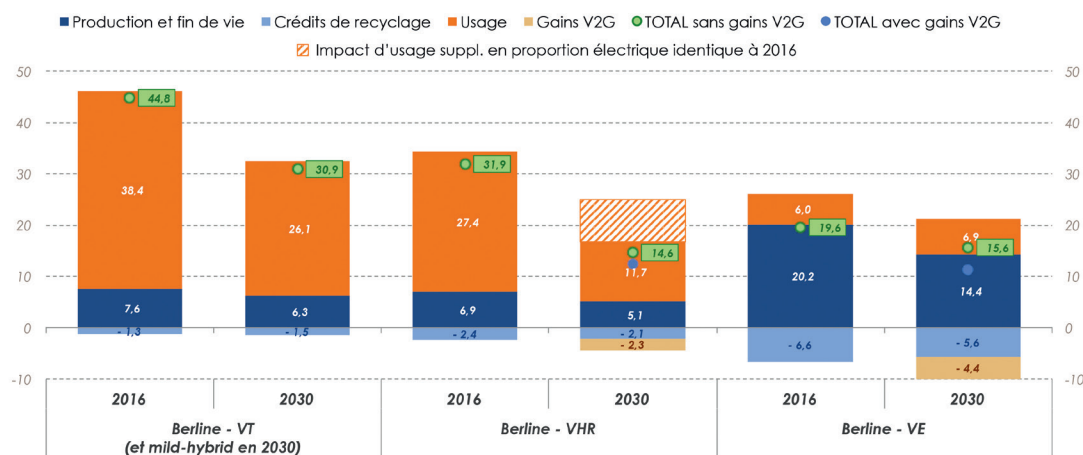
Si l'on associe les gains du V2G à l'impact ACV des véhicules électriques, l'avantage vis-à-vis de leur équivalent thermique est renforcé.

Figure 20 : Contribution au changement climatique 2016-2030 intégrant les services aux systèmes électrique/ résultats dans le cas du mix carboné (15% ENR-19% fossiles) en 2030

### Potentiel de réchauffement global des citadines (en t CO<sub>2</sub>eq) pour le mix carboné



### Potentiel de réchauffement global des berlines (en t CO<sub>2</sub>eq) pour le mix carboné



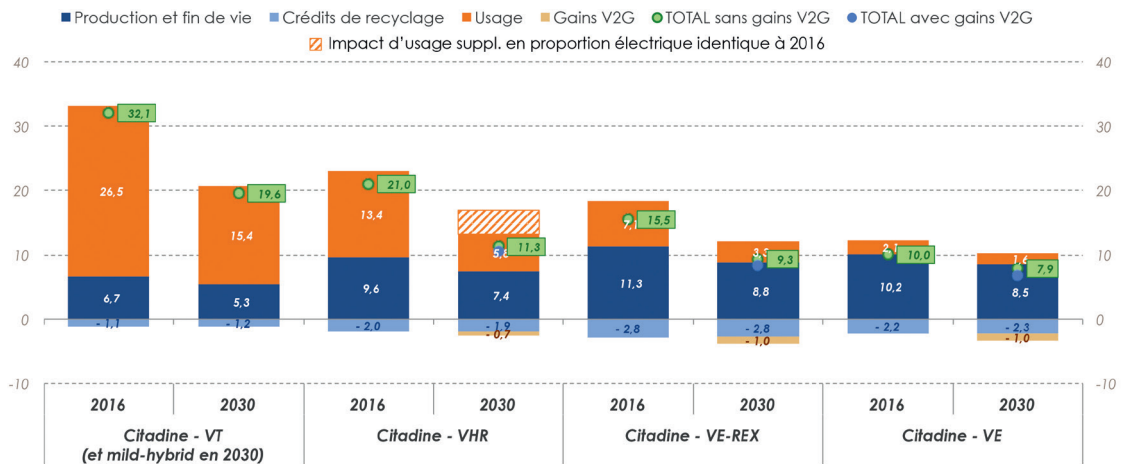
La comparaison des impacts agrégés sous différentes hypothèses de mix électrique met en exergue des gains en première vie toujours substantiels dans le cas d'un mix carboné. Ces gains sont même plus importants que sous l'hypothèse de mix « Transition énergétique ». En effet, la production étant partiellement fossile dans cette hypothèse de mix, une charge V2G peut tirer meilleur parti des variations du contenu carbone de l'électricité aux différentes heures de la journée. Cet effet prend le pas sur le contenu moyen d'électricité rechargée pour les besoins de mobilité. Bien qu'elle soit plus carbonée, l'évitement d'émissions est plus important.

Dans le mix contenant plus d'énergies renouvelables, l'effet opposé se produit. Les écarts de variation de l'impact carbone de l'électricité sont moins importants que dans un mix carboné, si bien que mécaniquement le V2G permet un gain moins important.

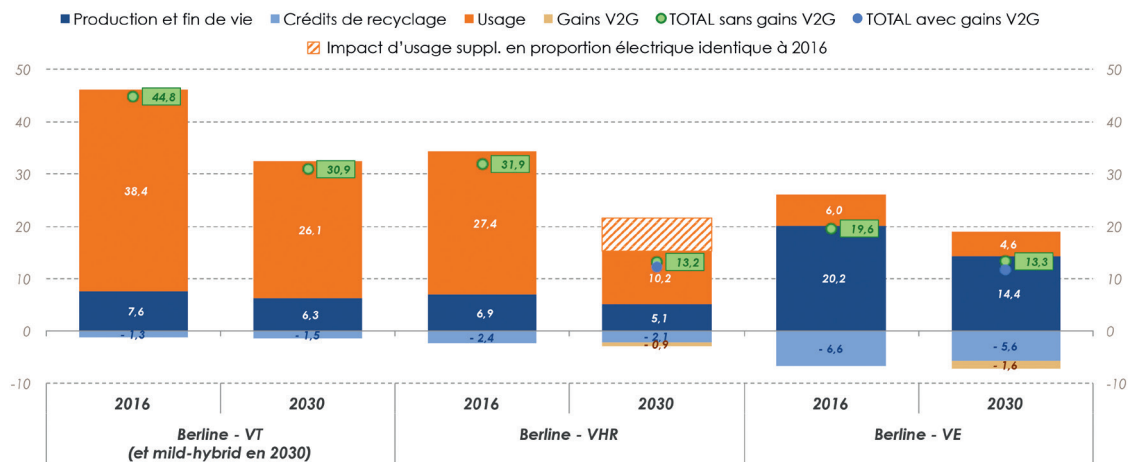
Pour ces raisons, le bénéfice environnemental de la fonction de stockage des batteries en première vie au sein de l'indicateur climat, et calculé de manière intégrée au cycle de vie, ne peut être utilisé qu'à titre indicatif.

Figure 21 : Contribution au réchauffement global 2016-2030 intégrant les services au système électrique/ résultats dans le cas d'un mix «Vers 100% ENR» en 2030

### Potentiel de réchauffement global des citadines (en t CO<sub>2</sub>.eq) pour le mix Vers 100% ENR



### Potentiel de réchauffement global des berlines (en t CO<sub>2</sub>.eq) pour le mix Vers 100% ENR



En comparaison des autres véhicules, l'impact du VHR en 2030 est relativement équivalent à celui des VE. Dans le cas d'un mix « vers 100% ENR », l'impact du VHR en 2030 est même légèrement inférieur à celui du VE. Cela s'explique par un impact plus faible lors de la phase de production de la batterie et par l'amélioration des consommations thermiques et électriques à l'usage. Dans l'analyse, le VHR cumule en effet les taux d'amélioration des véhicules diesel et essence, et une hypothèse de conduite en mode électrique plus ambitieuse, de 50% à 75%, entre 2016 et 2030. Les performances du VHR comparées au VE sur son cycle de vie sont à considérer au regard du nombre de kilomètres parcourus en mode électrique.

Pour aller plus loin, l'évaluation des capacités, relative à la fonction de stockage, peut permettre de rendre des services au système électrique et de générer un bénéfice environnemental.

## 2.3. Potentiel de services rendus au système électrique pour 4,4 millions de véhicules électriques

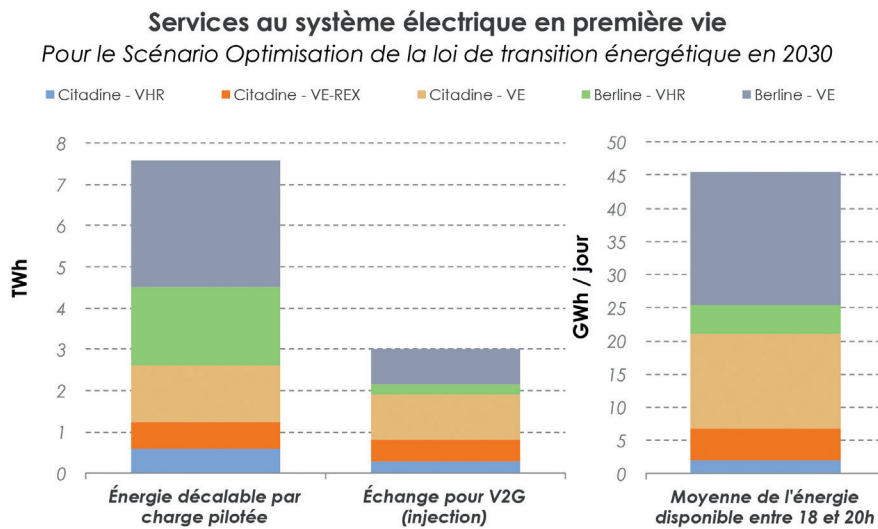
### a. En première vie

Étant donné les hypothèses de composition du parc de véhicules électriques formulées pour 2030 dans le scénario de référence, leur consommation d'électricité s'élève à 11,3 TWh par an (hors pertes à la charge). Dans le cas où la charge des véhicules électriques est pilotée (pour être retardée ou anticipée selon l'optimum carbone par exemple), les véhicules permettent de rendre des services au système électrique en lui apportant de la flexibilité. Dans le cas du scénario Ambition transition énergétique [2], dans lequel 40% des charges sont des charges dites « optimum carbone » et 30% des véhicules réalisent des

opérations de V2G, la consommation qui peut être décalée sur l'année représente plus de 7 TWh par an. Les charges bidirectionnelles intègrent ici une perte à la charge / décharge de 10% (taux de rendement de 90%).

Les véhicules pouvant faire de la charge bidirectionnelle (V2G) ils sont amenés à soutirer de l'électricité supplémentaire à celle nécessaire pour leurs besoins de mobilité, et à la restituer (modulo une perte) au moment le plus opportun. **Pour 4,4 millions de véhicules, ce sont près de 3 TWh dans l'année qui sont ainsi réinjectés sur le réseau, en grande partie par les VE.**

Figure 22 : Services au système électrique/ Potentiel du scénario 1, Ambition transition énergétique

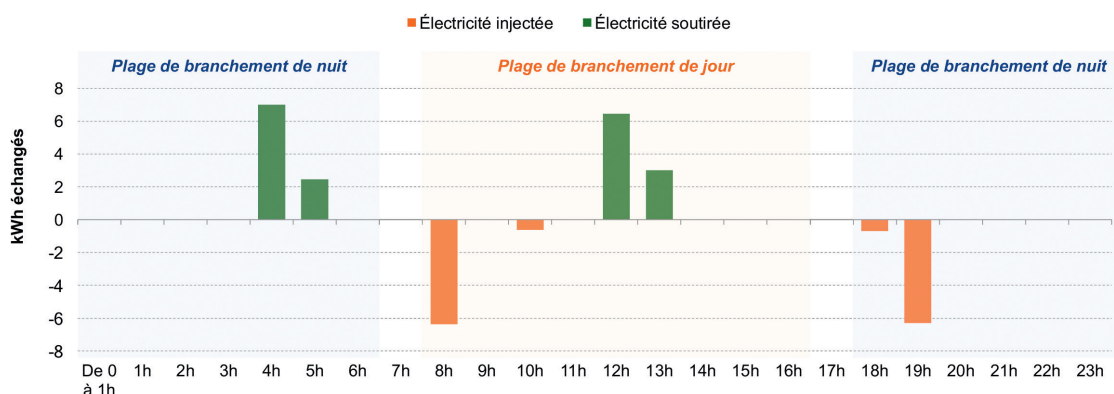


Pour la citadine VE, la figure 19 est un exemple d'un cas d'usage de V2G sur une semaine d'hiver dans le cadre du scénario 1. On y voit que le véhicule vient en soutien au système électrique lorsqu'il arrive sur son infrastructure de charge, que ce soit en début de soirée (18 et 19h) ou en matinée après son déplacement (8h), où il réinjecte de l'ordre de 6 kWh. Le véhicule se recharge à des moments où le système électrique est moins contraint, soit entre 12h et 14h et entre 4h et 6h dans le cas illustré. Pour 1 million de véhicules, cela

représente des flux de plusieurs GWh qui peuvent être pilotés en fonction des heures où la consommation électrique varie. A titre indicatif, pour une journée d'hiver, la consommation d'électricité varie entre 60 et 80 GWh par heure. Ainsi, les véhicules électriques qui réalisent des opérations de V2G apportent une solution de flexibilité supplémentaire pour le système électrique, en permettant de moduler plusieurs GWh au sein de ces fluctuations.

Figure 23 : Cas d'usage du V2G (journée d'hiver)

### Échanges d'électricité avec le véhicule en V2G – cas d'une citadine VE



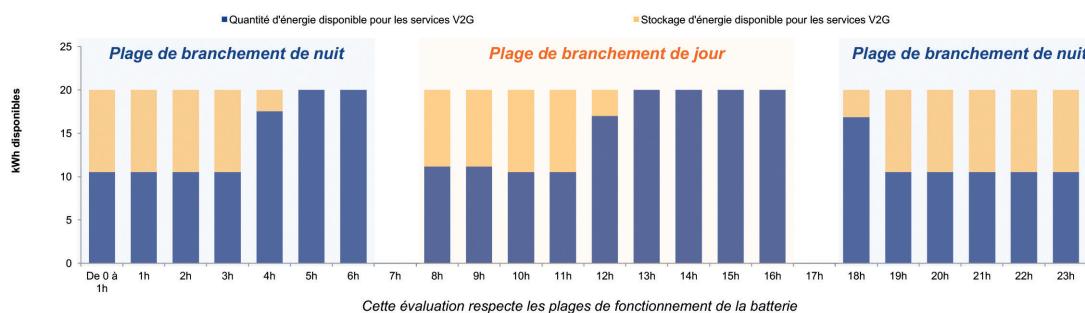
Par ailleurs, lorsqu'après une journée de déplacement les véhicules électriques sont branchés sur un point de recharge à domicile, ils renferment une énergie résiduelle dans la batterie. En effet, hormis pour les longs trajets, la capacité des batteries est nettement supérieure à la portée des trajets effectués par les véhicules dans une journée. Ainsi, cette énergie pourrait être mobilisée pour soutenir les moyens de production électrique en cas de forte demande nationale d'électricité. Ce potentiel est apprécié au regard de l'énergie disponible en moyenne sur la plage horaire de 18 à 20h (car c'est autour de cette plage horaire que le système électrique est sujet à la pointe de consommation en hiver).

**Les 4,4 millions de véhicules, tels que modélisés dans l'étude, représentent un potentiel maximal d'environ 45 GWh réinjectables sur cette plage horaire, grâce à l'énergie restante dans les batteries, pendant un jour moyen.** Il s'agit d'une quantité d'énergie importante si l'on considère que la consommation varie entre 60

et 80 GWh par heure, pour une journée d'hiver par exemple. Le potentiel des véhicules tient compte de toute l'énergie résiduelle dans les véhicules (sans limitation de l'état de charge minimum pour la batterie), c'est pourquoi il s'agit d'un potentiel de réserve en cas de forte nécessité, qui ne peut être mobilisé qu'en partie, qu'à certains moments de l'année et à une vitesse qui ne peut pas excéder les puissances unitaires des points de recharge. Ainsi, ce potentiel correspond à quelques GW (10% de la capacité maximale) qui pourraient être appelés très rapidement, sur une plage de quelques heures en cas de besoin.

La figure ci-dessous présente, pour la citadine VE, le gisement d'énergie disponible qui peut être injecté dans le système électrique et la capacité de stockage du véhicule, dans les limites d'un état de charge qui varie entre 50 et 90% en charge normale. Ces limites correspondent respectivement à 25 et 45 kWh, pour permettre de respecter les besoins prioritaires de mobilité.

Figure 24 : Gisements d'énergie disponible et capacité de stockage d'une citadine VE en 2030



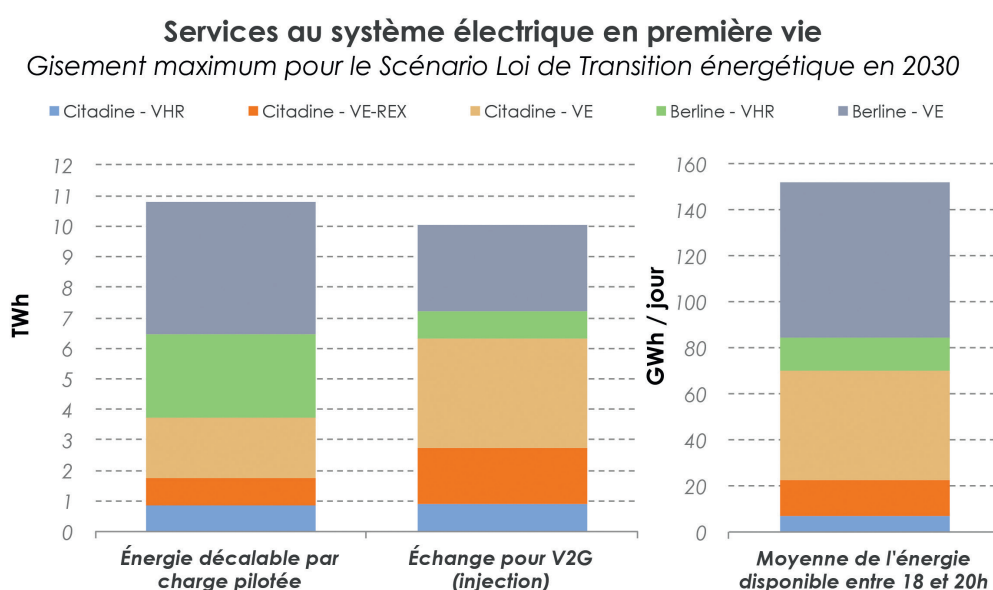


Le gisement maximum des services au système électrique peut être calculé dans le cas où 100% des véhicules sont à même de réaliser des échanges en V2G. Dans ce cas, ce sont près de 11 TWh par an qui peuvent être décalés dans le temps grâce aux charges pilotées, et 10 TWh par an peuvent être réinjectés dans le système électrique par les véhicules. Enfin, le gisement d'énergie disponible est très important si les batteries sont mobilisées au-delà de leur plage de fonctionnement standard (en cas de nécessité accrue) : 150 GWh en moyenne sont ainsi disponibles

dans les batteries des véhicules électriques entre 18 et 20h.

Les résultats présentés dans la figure qui suit sont obtenus lorsque le taux d'accès à des points de charge en journée est de 50% lors des déplacements locaux. Cela signifie que, pour la moitié des profils de déplacements, les véhicules électriques peuvent se recharger avant leur retour à destination le soir (hors déplacements longue distance, effectués aux dates de départ et retour de congé).

Figure 25 : Estimation des gisements maximums avec 100% des charges qui sont éligibles au V2G



## b. En seconde vie

En seconde vie, le nombre de batteries ayant une application de stockage stationnaire en 2030 est évalué sur la base du stock de véhicules électriques à partir de 2020. L'étude estime un stock équivalent à 961 322 batteries pour 2020. Ce chiffre correspond au nombre de véhicules électriques (VE et VHR) en circulation en 2020, dont les batteries arrivent en seconde vie en 2030<sup>29</sup>. Selon cette hypothèse, la **capacité de stockage représenterait 8 TWh par an**, soit l'équivalent de 2% de la production supposée en 2030 dans ce scénario. Bien que l'énergie puisse être réinjectée dans le système électrique, et donc de se substituer à une production additionnelle d'électricité (par exemple lors des pointes de consommation), les batteries ne sont pas des moyens de production mais des moyens de stockage.

Si toutes les batteries du parc électrique de 2030 sont utilisées pour du stockage stationnaire, c'est-à-dire 4,4 millions de batteries en seconde vie à partir de 2040, la **capacité de stockage présenterait environ 37 TWh par an**.

De ce point de vue, 2030 doit être vu comme un point de passage vers une situation plus favorable à la deuxième vie, dans une perspective 2050. Le rythme de déploiement des véhicules électriques jouera un rôle majeur pour le déploiement de cet usage de stockage.

29 – Source : Stratégie nationale de mobilité propre, PPE 2016.

## 3. SCÉNARIOS 2030

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour les 3 scénarios contrastés de l'étude, dont la méthode de construction est décrite dans le Chapitre Méthodologie, Partie 6.

TABLEAU 3 : HYPOTHÈSES DES SCÉNARIOS DE L'ÉTUDE

Paramètre	Variable (unité)	Scénario de référence : LTECV	Scénario 1 : Ambition transition énergétique	Scénario 2 : Accélération en faveur des énergies renouvelables	Scénario 3 : Renoncement politique
1. Mix électrique	Part respective des différentes sources d'énergie	Transition énergétique (39% ENR)	Transition énergétique (43% ENR)	Vers 100% ENR (43% ENR)	Fossile (15% ENR- 19% fossiles)
2. Efficacité énergétique des modes de production (fabrication)	Gains d'efficacité énergétique entre 2016 et 2030 = 2% par an	Oui	Oui	Oui	Non
3. Consommation thermique des véhicules (phase d'usage)	Evolution de la consommation unitaire	Baisse de la consommation moyenne	Baisse de la consommation moyenne	Baisse de la consommation moyenne	Maintien des niveaux de consommation actuels
4. Evolution des batteries	Masse et capacité des batteries (en Kg et en Wh)	Croissance de l'efficacité énergétique	Croissance de l'efficacité énergétique	Maîtrise de l'autonomie	Croissance de l'autonomie
5. Recyclage	Taux de recyclage de la batterie (en%)	50%	70%	85%	50%
6. Parc de VE-VHR	Nombre total de véhicules électriques dans le parc (en millions de véhicules)	4,4	4,4	5,5	1,5
7. Composition du parc	Part des véhicules hybrides rechargeables	67%	50%	50%	67%
8. Réseaux intelligents	Taux de charge pilotée et proportion des recharges qui sont pilotées pendant l'optimum carbone	-	40%	60%	20%
9. Infrastructures	Taux d'accès à la prise en journée	50%	50%	75%	25%
10. V2G	Taux de V2G et proportion des charges bidirectionnelles	-	30%	30%	10%

### 3.1. Mesure des impacts des trois scénarios

Les résultats comparés des scénarios sont exprimés en base 100, pour un indicateur donné ou pour une phase donnée, par rapport au scénario 1, Ambition transition énergétique, et, pour s'affranchir de l'effet de volume du parc, en tenant compte d'un nombre de véhicules équivalent pour chacun. Les résultats peuvent ainsi s'interpréter comme étant l'évolution des impacts d'un véhicule représentatif de chaque scénario par rapport au véhicule du scénario 1.

#### a. Comparaison des impacts environnementaux entre les scénarios

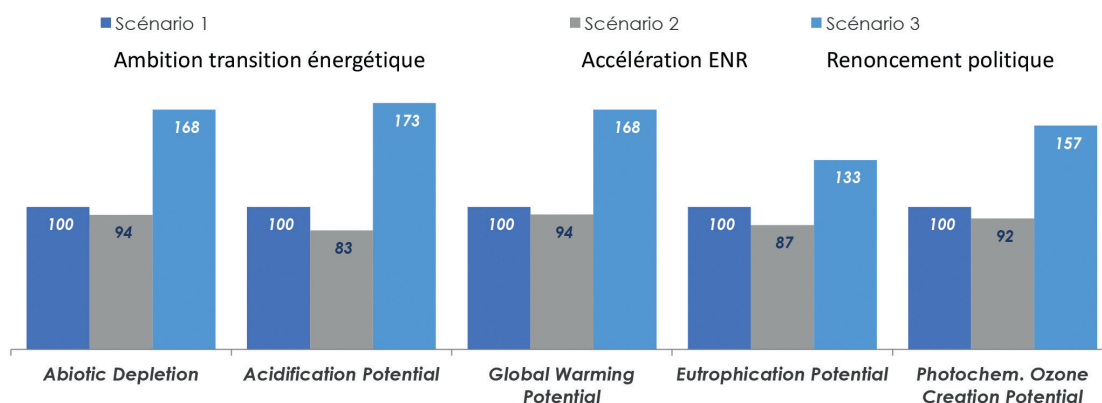
L'ensemble des indicateurs révèlent que le scénario Renoncement politique [3] se traduit par un impact significativement accru par rapport au scénario Ambition transition énergétique [1.] L'évolution du scénario

Accélération en faveur des énergies renouvelables [2] reflète des impacts légèrement inférieurs au scénario 1, plus particulièrement sur les indicateurs de potentiel d'acidification et d'eutrophisation.

Si l'amplitude des variations des impacts entre les scénarios Ambition transition énergétique (1) et Accélération en faveur des énergies renouvelables (2) est relativement faible, l'impact comparé entre l'un et l'autre s'apprécie différemment selon qu'on privilégie un indicateur plutôt qu'un autre. En effet, dans le scénario 2, la consommation de ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de 6% moins importantes que dans le scénario 1. L'écart se creuse entre les deux scénarios au regard des autres indicateurs : en particulier les potentiels d'acidification et d'eutrophisation (respectivement -17% et -13%).

Figure 26 : Impacts environnementaux comparés des scénarios

Impacts sur ensemble de cycle de vie, rapportés en base 100 pour chaque indicateur par rapport au scénario 1 et pour un même nombre de véhicules



#### b. Comparaison par phase du potentiel d'acidification entre les scénarios

Le potentiel d'acidification aura un impact différencié d'un territoire à l'autre, et il dépend de la capacité des milieux naturels à absorber les retombées acides.

Comparé au scénario *Ambition transition énergétique* [1], les impacts cumulés diffèrent, avec une baisse de 17% dans le scénario *Accélération en faveur des énergies renouvelables* [2] et une hausse de 73% dans le scénario *Renoncement politique* [3]. En comparaison, l'impact des véhicules pendant les différentes phases du cycle de vie, la variation des impacts liés à la phase de production et à la fin de vie des véhicules sont significatifs.

La hausse dans le scénario *Renoncement politique* [3]

est la conséquence de deux effets qui se conjuguent : la croissance non maîtrisée des packs batteries et l'absence d'amélioration des processus de fabrication. Pendant la phase d'usage, le potentiel d'acidification augmente fortement, en lien avec un mix électrique carboné, mais également avec une consommation thermique des VHR qui ne s'améliore pas après 2016. Une part moins importante d'énergie fossile dans le mix électrique et un recours plus fréquent à la charge optimum carbone et au V2G permettent de réduire l'impact de la phase d'usage du scénario *Accélération en faveur des énergies renouvelables* [2] par rapport au scénario de référence. Dans ce scénario [2], la diminution des masses des batteries est le facteur principal d'une baisse des impacts par rapport au scénario [1].

### Les enjeux du recyclage

Les crédits de recyclage varient peu entre les scénarios. Ils doivent néanmoins être appréciés au regard de l'impact initial généré en phase de production. Ainsi, dans le cas du scénario Accélération en faveur des énergies renouvelables (2), si la hausse du taux de recyclage des matières (de 70% à 85% de matières recyclées) ne produit pas de hausse importante des crédits, cela s'explique par la baisse des masses des batteries entre 2016 et 2030.

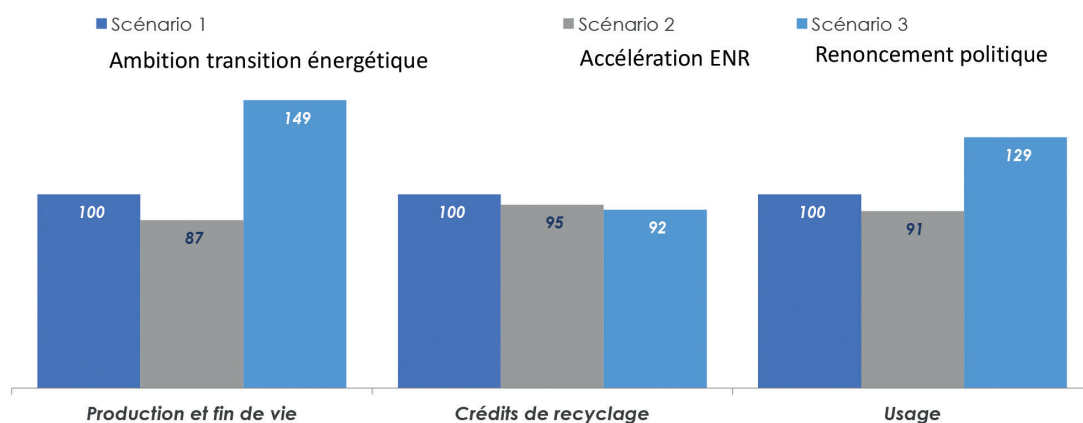
Dans le cas le scénario Renoncement politique (3), l'effet opposé se produit : la baisse du taux de recyclage est plus importante que l'effet de la hausse

des masses de batteries. Cette baisse illustre qu'une plus grande quantité de matière est recyclée, mais ne donne pas l'indication de l'impact réel de la batterie sur l'impact total. Les variations des crédits de recyclage semblent en effet converger entre les scénarios, alors que l'impact réel est fortement différencié.

Ces observations mettent en exergue le caractère déterminant du recyclage pour réduire les impacts environnementaux des véhicules électriques. Elles montrent également l'intérêt d'une analyse plus approfondie afin d'évaluer, entre autres, les potentiels de l'économie circulaire pour réduire l'empreinte des véhicules sur l'environnement et générer de nouvelles opportunités au sein des chaînes de valeurs.

Figure 27 : Potentiel d'acidification des scénarios selon les phases du cycle en première vie

Potentiel d'acidification sur l'ensemble de cycle de vie, rapporté en base 100 pour chaque phase par rapport au scénario 1 et pour un même nombre de véhicules



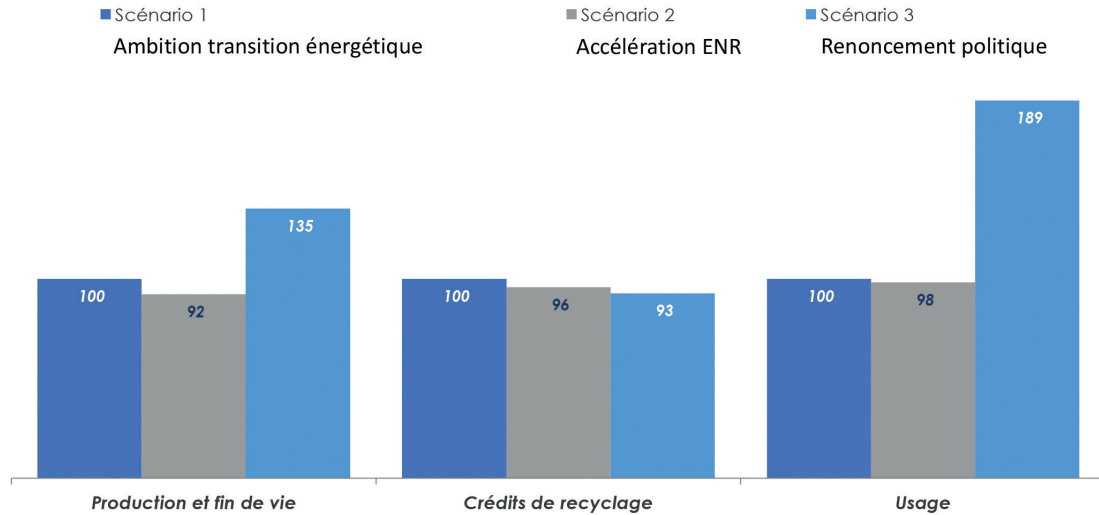
### c. Comparaison par phase de la contribution au pouvoir de réchauffement global entre les scénarios

L'évolution des impacts de l'indicateur de pouvoir de réchauffement global en première vie est sensiblement équivalente entre les scénarios 1 et 2. L'impact plus faible à la production et la fin de vie dans le scénario 2 s'explique par l'évolution des masses de batteries, plus faible que dans le scénario 1.

Les écarts entre les scénarios 1 et 3 (+89%) s'expliquent notamment par la capacité accrue des batteries, par la composition du mix électrique carboné, et par l'absence d'amélioration de la consommation thermique des VHR et des VE-REX. La plus forte proportion de ces véhicules dans le stock impacte également cette hausse significative.

Figure 28 : Contribution au réchauffement global des scénarios par phase du cycle en première vie

Potentiel de réchauffement global sur ensemble de cycle de vie, rapporté en base 100 pour chaque phase par rapport au scénario 1 et pour un même nombre de véhicules



### 3.2. Potentiel de services rendus au système électrique dans les trois scénarios

Cette section présente la consommation totale des véhicules électriques, modélisée pour leur usage de mobilité, ainsi que quatre indicateurs de services au système électrique. Ces indicateurs prennent leur sens quand ils sont appréciés à l'échelle du parc de véhicules électriques. Les résultats dans cette section ne sont pas exprimés en nombre de véhicule constant, mais en tenant compte d'hypothèses contrastées sur la taille du parc.

Le tableau ci-dessous présente les indicateurs en valeur absolue selon les parcs des différents scénarios.

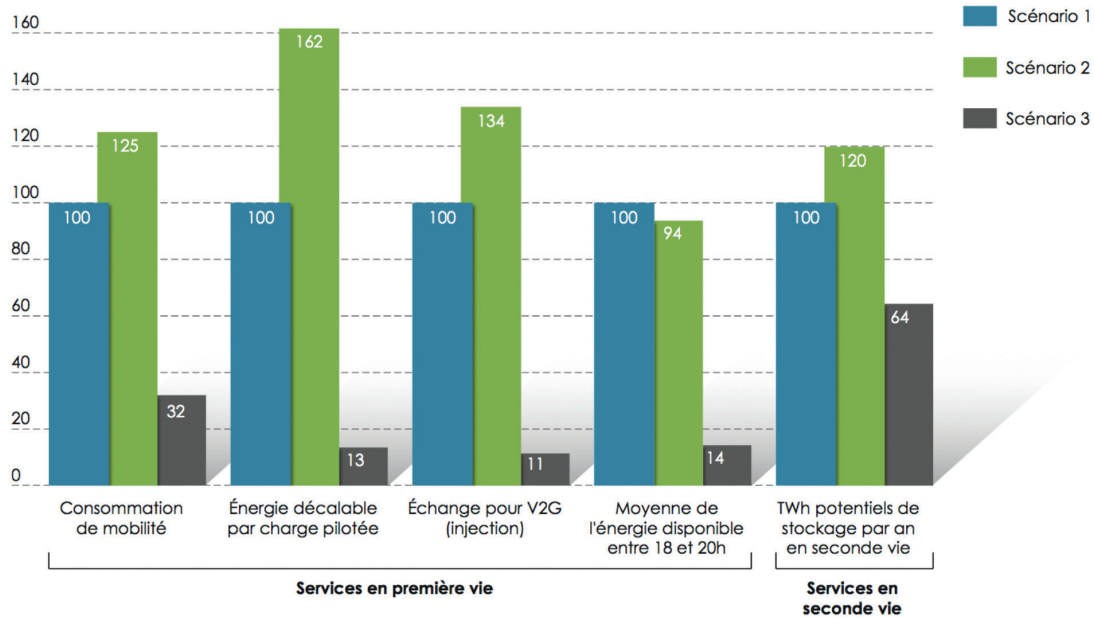
		Scénario 1 Ambition transition énergétique	Scénario 2 Accélération en faveur des ENR	Scénario 3 Renoncement politique
Consommation de mobilité*	TWh / an	12,1-13,4	15-16,7	3,9-4,3
Énergie décalable par charge pilotée	TWh / an	7,6	12	1,0
Échange pour V2G (injection)	TWh / an	3,0	4,0	0,3
Moyenne de l'énergie disponible entre 18 et 20h	TWh / jour	0,046 (46 GWh)	0,043 (43 GWh)	0,006,5 (6,5 GWh)
TWh potentiels de stockage par an en seconde vie	TWh / an	8,1	9,7	5,2

La consommation de mobilité est présentée ici sur la base d'une fourchette de valeurs. La valeur basse n'intègre pas les pertes liées à la charge et à la décharge des véhicules en charge normale. La valeur haute intègre 10% de pertes. Dans les figures illustrées, c'est la valeur basse qui est prise en compte.

Les potentiels des services au système électrique dans chaque scénario, décomposés par type de véhicules, sont présentés en Annexe 5.

Le graphique ci-dessous présente les mêmes indicateurs exprimés en base 100, correspondant aux valeurs des indicateurs du scénario 1.

Figure 29 : Potentiel de service rendus au système électrique par les différents scénarios



Les variations des indicateurs s'interprètent en premier lieu au regard de l'évolution du nombre de véhicules électriques dans le parc considéré. Entre le premier et le troisième scénario, la taille du parc modélisé triple et les taux d'accès aux charges pilotables sont multipliés par deux ou trois. Par ailleurs, la composition du parc de véhicules accentue le contraste entre les deux scénarios puisque les VE, plus nombreux en proportion dans les scénarios 1 et 2, ont des impacts plus forts que les VHR et les VE-REX. Par conséquent, les indicateurs en première vie varient dans un intervalle de 3 à 10. Selon les scénarios, les volumes d'énergie consommés pour la mobilité évoluent dans un intervalle de 4 à 12 TWh par an. Les volumes qui peuvent être décalés oscillent de 1 à près de 8 TWh par. Les volumes d'échanges V2G qui peuvent être réinjectés évoluent de 0,3 à 3 TWh par an injectés. Les volumes d'énergie disponibles au moment de la pointe de consommation électrique fluctuent de 7 à près de 46 GWh par jour.

On peut observer que seuls les scénarios [1 et 2] qui respectent la loi de transition énergétique permettent d'atteindre un niveau de services au système électrique significatif grâce au V2G. Un niveau de déploiement insuffisant du véhicule électrique ne permet pas d'envisager l'opportunité du recours à la fonction secondaire des batteries.

Les variations entre le premier et le deuxième scénario s'interprètent quant à elles presque exclusivement par la variation du nombre de véhicules considérés (+1,1 millions, soit une augmentation de 25%). Ainsi, la consommation des véhicules augmente d'un quart, proportionnellement au parc, pour atteindre 15 TWh.

L'effet de la hausse du parc de 25%, couplée avec le passage de 70% à 90% de toutes les charges pilotées, est significatif. En effet, la fraction de la charge qui peut être décalée dans le temps augmente de 60% pour représenter jusqu'à 12 TWh par an.

L'évolution des échanges de V2G est plus difficile à interpréter. S'il y a effectivement plus de véhicules dans le scénario 2, Accélération en faveur des énergies renouvelables, l'indicateur augmente en plus grande proportion que la taille des parcs modélisés (près d'un tiers contre un quart pour le parc). Cela s'explique par l'évolution du taux d'accès aux points de charge en journée, plus nombreux dans le scénario 2, qui permettent d'effectuer plus de charges bidirectionnelles en journée comme en soirée. Les échanges atteignent ainsi 4 TWh par an d'électricité injectée.

La quantité d'énergie disponible en début de soirée baisse entre les scénarios 1 et 2. Dans le scénario 2, l'accès aux infrastructures de charge en journée per-

met aux véhicules d'avoir un état de charge plus important à leur arrivée en zone résidentielle en début de soirée. Néanmoins, les capacités des batteries sont également moins importantes que dans le scénario 1, ce qui diminue le potentiel de réserve d'énergie en soirée. L'effet des capacités des batteries est donc plus important que l'effet de l'accès aux charges en journée.

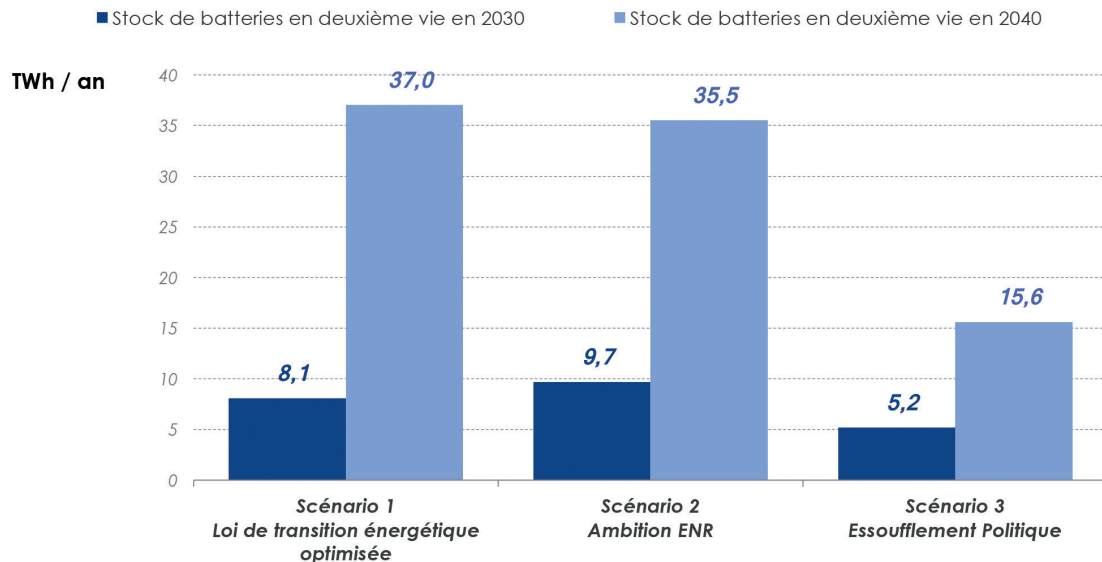
Cette observation est sensible aux usages, aux pratiques ainsi qu'à leur évolution. Les pratiques de charge à la maison et en journée sont réputées relever de la motivation des automobilistes, d'incitations ou de contraintes à la recharge différée et bidirectionnelle, qui ne sont pas quantifiées dans cette étude.

### 3.3. Evaluation de la capacité de stockage d'un stock de batteries en seconde vie

La durée de vie considérée dans cette étude pour les batteries en seconde vie est de 5 ans. Il s'agit d'une durée moyenne au regard des sources disponibles et des retours d'expériences. Initialement, la plage de variabilité de cette durée de vie était comprise entre 3 et 7 ans. Néanmoins, même si une durée de vie unique a été retenue, il est important de noter que la durée de vie jouera un rôle clé dans le déploiement de ces capacités de stockage.

En 2030, selon les scénarios, la capacité de stockage varie entre 5 et 10 TWh par an. En 2040, les scénarios divergent, avec des potentiels de stockage et de réinjection allant de 15 à 37 TWh par an. Si la situation en 2030 n'est finalement que peu contrastée entre les 3 scénarios (entre 5,2 et 9,1 TWh), elle engage des futurs fortement différenciés pour 2040 et à fortiori pour 2050. De ce point de vue, 2030 doit être considéré comme un point de passage névralgique vers 2050.

Figure 30 : Capacité de stockage en seconde vie comparée entre les scénarios



## 4. ANALYSES DE SENSIBILITÉ POUR LA PROSPECTIVE 2030

Les résultats détaillés des analyses de sensibilité sont présentés en Annexe 6.

### 4.1. Sensibilité à l'évolution du mix énergétique en 2030

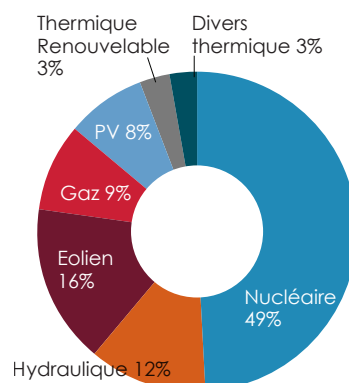
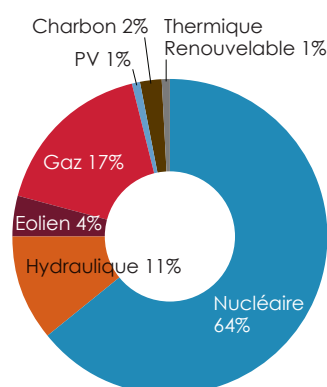
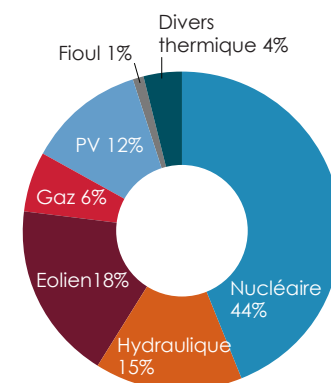
#### a. Evolution du mix électrique moyen

Pour mesurer la sensibilité de l'impact environnemental des véhicules électriques au mix énergétique, l'analyse fait varier la composition des sources d'énergies sans modifier les autres paramètres. Dans le cas d'une évolution d'un mix Transition énergétique (39% d'ENR) vers un Mix carboné (15% ENR et 19% fossiles), la hausse des impacts est significative sur les indicateurs d'épuisement des ressources fossiles (+19%), de pouvoir de réchauffement global (+13%) et d'acidification des écosystèmes.

A l'inverse, dans le scénario Accélération en faveur des énergies renouvelables (2), l'évolution d'un mix Transition énergétique vers un Mix 100% ENR (43% d'ENR), permet d'observer une baisse des impacts, comprise entre 2% et 6% en fonction des indicateurs.

La variation des impacts en fonction de la nature du mix électrique montre l'importance que peut avoir l'apport des énergies renouvelables pour réduire l'empreinte environnementale des véhicules électriques sur l'ensemble des indicateurs traités dans cette étude.

Figure 31 : trois hypothèses de mix électriques en 2030





## b. Sensibilité de l'indicateur « climat » à la variabilité du facteur d'émission

Afin d'évaluer la sensibilité de l'impact climatique des véhicules électriques au mix énergétique, l'impact de la phase d'usage et l'impact total (avec crédits de recyclage) ont été calculés en faisant varier le facteur d'émission de l'électricité entre 0 et 500 gCO<sub>2</sub> / kWh.

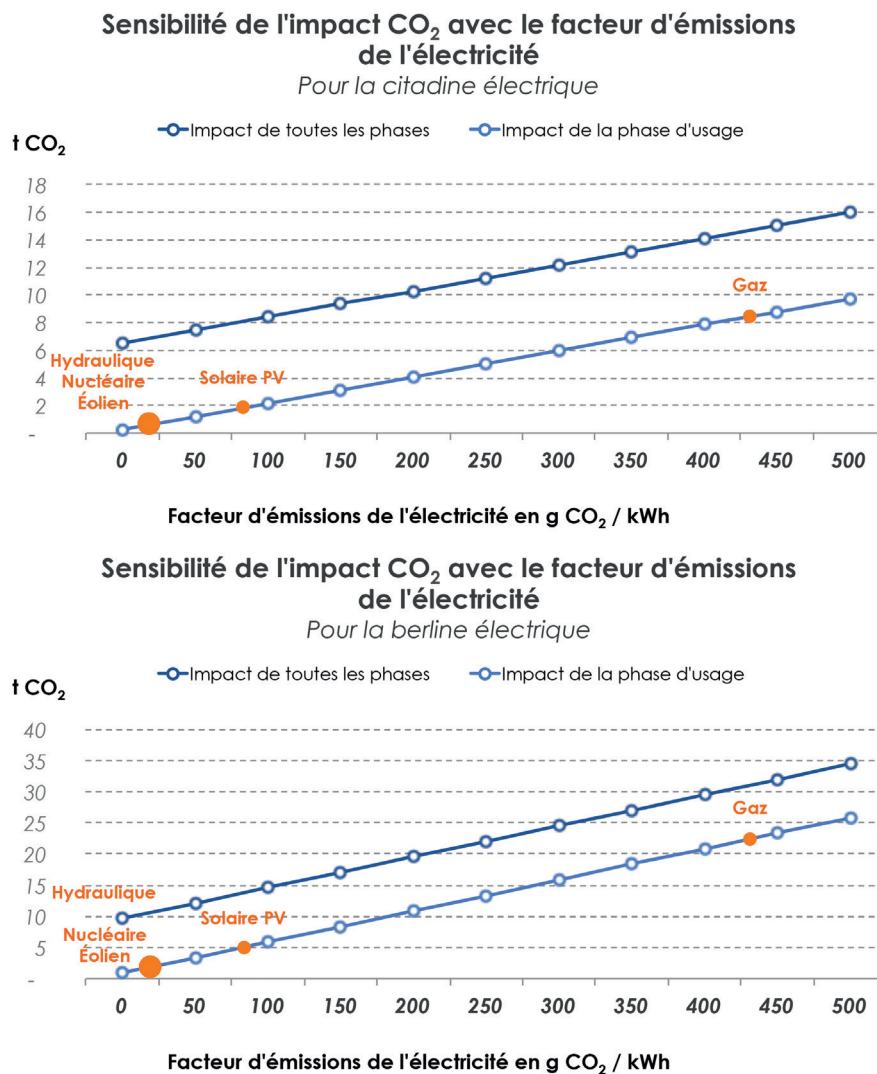
Cela permet de couvrir l'impact carbone des principales filières de production d'électricité en France : nucléaire, hydraulique, gaz (en turbines à cycle combiné), solaire photovoltaïque et éolien.

Les résultats, illustrés par la figure ci-dessous, s'interprètent dans le cas où 100% des charges pendant

10 ans sont effectuées de manière marginale avec un facteur d'émission donné. La sensibilité de la phase d'usage des VE au facteur carbone de l'électricité est importante. Chaque gramme de CO<sub>2</sub> par kWh ajoute environ 20 kg CO<sub>2</sub> à l'impact de la citadine VE sur l'ensemble de sa durée de vie, et 50 kg CO<sub>2</sub> pour la berline VE. La différence de sensibilité entre ces véhicules s'explique par le kilométrage plus important parcouru par la berline et par une consommation électrique au kilomètre supérieure.

En comparaison, le doublement du facteur d'émission de l'électricité de 100 à 200 g CO<sub>2</sub> / kWh sur 100% des charges, pendant 10 ans, constitue pour la citadine un accroissement de son impact total d'un quart, et d'un tiers pour la berline.

Figure 32 : Sensibilité de l'indicateur climatique au facteur d'émission de l'électricité



**Point de vigilance** : cette sensibilité est analysée de manière directe pour la fonction primaire des véhicules électriques, qui est la mobilité. Dès lors que l'on considère la fonction secondaire de la batterie, à savoir le stockage, le véhicule peut avoir une incidence sur le déploiement des énergies renouvelables (soutien à l'autoconsommation par exemple) et donc sur le mix. Cet impact n'est pas mesuré ici mais constitue une piste de réflexion pour les travaux futurs.

---

## 4.2. Sensibilité à l'évolution des packs batteries

Pour rappel, l'étude considère trois hypothèses d'évolution des batteries en 2030 :

**Hypothèse 1** : croissance tendancielle (hypothèse de référence) : les batteries gagnent en efficacité énergétique, pour devenir plus performantes, avec une plus grande capacité ;

**Hypothèse 2** : croissance de l'autonomie : l'augmentation des capacités des batteries est maximale ;

**Hypothèse 3** : maîtrise de l'évolution des batteries : cette hypothèse prend en compte, d'ici 2030, l'arrivée de batteries avec des capacités modérées.

La sensibilité est calculée ici à partir de l'hypothèse 1, afin d'évaluer le risque lié à l'hypothèse 2 et les opportunités liées à l'hypothèse 3.

L'analyse du cycle de vie identifie la production de la batterie comme étant un des facteurs principaux de l'impact environnemental des véhicules électriques. En fonction des évolutions des batteries d'ici 2030, cet impact pourra être plus ou moins maîtrisé. L'analyse montre qu'une croissance maximale de l'autonomie des batteries, associée à des batteries de fortes capacités et de grandes masses, augmentent nettement le potentiel d'acidification des citadines, VHR (+20%) et VE-REX (+30%). Le potentiel d'eutrophisation est également en hausse (jusqu'à + 21% pour le VE-REX). Les berlines sont moins sensibles car la variation de masse sur les hypothèses de batteries est moins importante.

Dans le cas d'une croissance maximale des packs batteries (hypothèse 3), les indicateurs de consommation de ressources fossiles et d'émissions de gaz à effet de serre augmentent de 11 et 12%, par rapport à l'évolution tendancielle (hypothèse 1).

La maîtrise de la croissance des packs batteries est une opportunité pour réduire les impacts environnementaux des véhicules électriques. L'effet baissier se vérifie sur tous les indicateurs, notamment sur le potentiel d'acidification (jusqu'à -23% pour la citadine VE) et le potentiel d'eutrophisation (jusqu'à -17% toujours pour la citadine VE). C'est pour les citadines que la sensibilité est la plus forte.

---

## 4.3. Sensibilité à l'évolution du taux de recyclage des matériaux (batteries)

Pour rappel, l'étude considère trois hypothèses d'évolution des taux de recyclage en 2030 :

**Hypothèse 1** : 50% (hypothèse de référence)

**Hypothèse 2** : 70%

**Hypothèse 3** : 85%

Les sensibilités sont présentées en comparaison de l'hypothèse de référence.

La citadine VE est la plus sensible à l'évolution du taux de recyclage, notamment sur les indicateurs « Potentiel d'acidification » et « Potentiel de création d'ozone photochimique ». L'augmentation maximale du taux de recyclage de la batterie permet de réduire d'environ 20% les impacts sur ces deux indicateurs et de 14% l'impact sur l'indicateur de « Pouvoir de réchauffement global ».

Les résultats de sensibilité pour les véhicules thermiques sont en dessous du seuil de prise en compte pour ce paramètre (entre 0 et 1% pour les différents indicateurs) et ne sont pas présentés ici.

**Points de vigilance** : le taux de recyclage exprimé dans cette étude correspond à un pourcentage de masse nette recyclée. Il ne donne aucune indication sur la nature de ce qui est recyclé, ni sur la possibilité de récupérer ces matériaux pour les réintégrer dans les filières de production industrielle.

#### 4.4. Sensibilité à la modification du nombre de batteries sur 10 ans

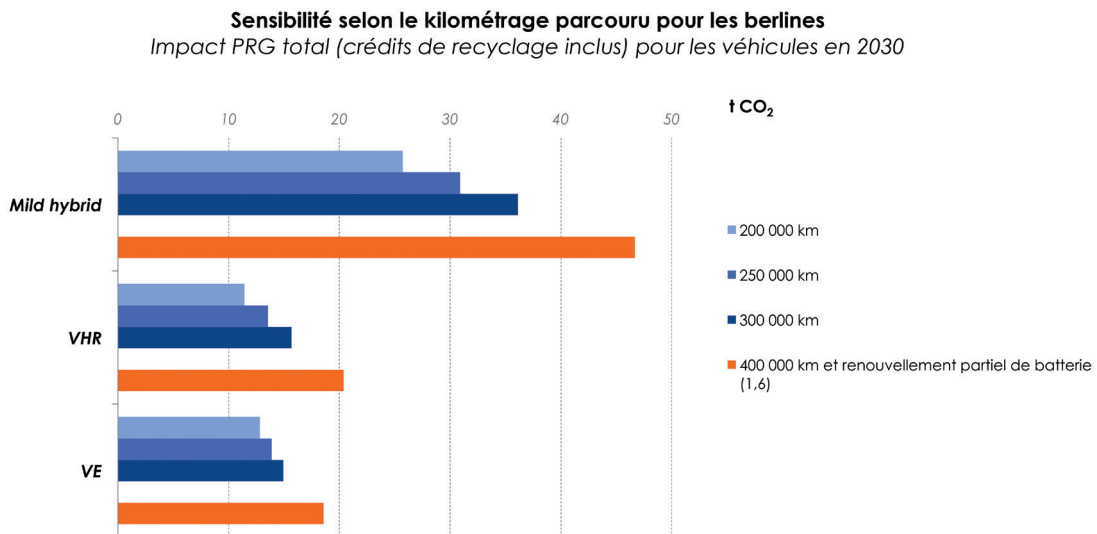
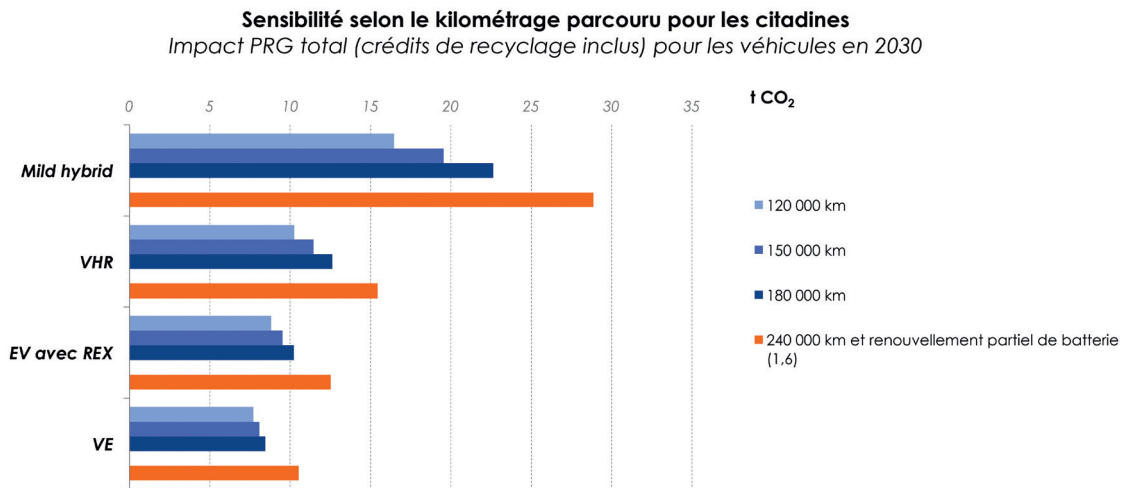
Cette sensibilité est mesurée à partir de l'hypothèse de référence, à savoir 1 batterie utilisée sur 10 ans en première vie. L'analyse de sensibilité traduit une réduction de la durée de vie de la batterie en ajoutant un impact supplémentaire sur les phases de production et de transport, équivalent à 1,2 et 1,5 fois l'impact initial.

L'augmentation du nombre de batteries sur 10 ans a un effet haussier sur les différents indicateurs : jusqu'à 11% d'augmentation du potentiel d'acidification pour 1,2 batterie par rapport à la citadine VE et jusqu'à + 28% pour la sensibilité à 1,5 batterie. La consommation de ressources fossiles et la contribution au réchauffement global augmentent de manière linéaire : + 5% pour 1,2 batterie et +13% pour 1,5 batteries.

#### 4.5. Sensibilité de l'impact climatique à la modification du kilométrage

Dans cette étude, les gammes de véhicules ont des kilométrages distincts : 150 000 km pour les citadines et 250 000 km pour les berlines, sur l'ensemble de la durée de vie des véhicules, en intégrant les crédits de recyclage. La sensibilité de l'indicateur d'impact de réchauffement global des véhicules au kilométrage a été mesurée en faisant varier ce paramètre. D'une part ont été appliquées une augmentation progressive du kilométrage [de 20% à 60% en plus], et d'autre part, une hausse du nombre de batteries sur la durée de vie (équivalent à 1,6 batterie par véhicule sur 10 ans)

Figure 33 : Sensibilité au kilométrage parcouru en 10 ans pour les citadines et berlines électriques



Sur l'ensemble des phases de la vie des véhicules, crédits de recyclage compris, l'augmentation du kilométrage ne diminue pas l'avantage comparatif des véhicules rechargeables, y compris en prenant en compte le remplacement partiel de la batterie dans le calcul d'impact. Cette sensibilité confirme l'avantage comparatif du VE, même dans le cas où la dégradation de la batterie interviendrait avant 10 ans du fait d'un kilométrage plus important.

Le marché de l'électromobilité en France est récent. Les échantillons de véhicules pris en compte dans les études sur les taux de dégradation des batteries après 10 ans, ou après 250,000 km en Europe, sont trop faibles pour assurer une représentativité statistique satisfaisante.

La variation du kilométrage (+20%) a un effet limité sur l'empreinte carbone des véhicules électriques. Pour les VE, la variation de 20% du kilométrage se traduit par une augmentation de 5% de l'impact total de la citadine, et de 8% de la berline. Pour le VE-REX, l'impact augmente de 7%. Pour les VHR, l'augmentation est de 10% pour la citadine et de 16% pour la berline.

L'impact des véhicules thermiques augmente plus fortement : autour de 16% pour la citadine essence et de 17% pour la berline diesel.

La prise en compte d'un kilométrage variant à plus de 60% (240 000 km pour les citadines, et 400 000 km pour les berlines) conduit à une hausse significative de l'impact total. Cette progression impacte de manière non linéaire les VE, puisqu'un renouvellement

de la batterie est introduit. Cette augmentation représente 30% de l'impact total de la citadine et 34% pour la berline. L'impact du VE-REX augmente de 31%, celui de la citadine VHR de 35% et celui de la berline VHR de 50%.

Pour les véhicules thermiques, l'impact évolue de 48% pour la citadine et 51% pour la berline.

## 4.6. Sensibilité au taux de pertes pour la recharge rapide

Une analyse de sensibilité a été menée pour mesurer l'incidence d'un taux de rendement abaissé à 70% [taux de perte équivalent à 30%] dans le cas des charges ultra-rapides. La sensibilité qui en résulte est minime. Ce rendement se traduit par une évolution de quelques points de pourcentage sur l'impact de la consommation d'électricité des véhicules électriques. Le tableau 4 présente les évolutions pour les différents indicateurs d'impact, et dans les deux hypothèses : avec ou sans accès à une infrastructure de recharge en journée pour les véhicules. L'évolution de l'impact de la consommation d'électricité influe à son tour la phase « usage » des véhicules, et plus précisément la contribution « Well-to-Tank » de l'électricité consommée par les véhicules. Cette contribution représente entre 10 à 20% de l'impact total du véhicule selon l'indicateur environnemental considéré. C'est donc en définitive une sensibilité qui porte sur un millième de l'impact total.

TABLEAU 5 : SENSIBILITÉ AU TAUX DE PERTES DE 30% DES CHARGES RAPIDES

	Abiotic Depletion (Fossil)	Acidification Potential	Global Warming Potential	Eutrophication	POCP
Avec borne en journée	2,0%	- 0,5%	- 0,2%	- 0,03%	2,8%
Sans borne en journée	0,004%	0,2%	0,02%	0,2%	0,1%

## 4.7. Sensibilité à l'évolution de la composition du parc électrique (variation en fonction du taux de VHR dans le parc électrique)

La composition du parc, relative ici au taux de VHR, différencie l'impact entre les différentes phases du cycle de vie.

En phase de production et de fin de vie, la baisse du taux de VHR fait augmenter l'impact environnemental du parc. Cet effet est généré par l'impact relatif plus lourd des VE à la fabrication et se vérifie sur les 5 indicateurs.

A l'usage, l'effet inverse se produit, l'augmentation de la part des VE induit une baisse de la consommation de ressources fossiles et de la contribution au réchauffement global. Pour les VHR, les impacts à l'usage sont particulièrement sensibles aux conditions d'usage, à la pratique des conducteurs. La variabilité en phase d'usage peut donc devenir beaucoup plus importante qu'elle n'apparaît ici dans les résultats.

# ANNEXES

<b>Annexe 1</b> : Qualité des données.....	2
<b>Annexe 2</b> : Composition matière des véhicules considérés.....	4
<b>Annexe 3</b> : Opérations de maintenance.....	5
<b>Annexe 4</b> : Indicateurs d'impacts 2016-2030 des 8 véhicules.....	6
<b>Annexe 5</b> : Services au système électrique par scénario et par type de véhicule.....	11
<b>Annexe 6</b> : Sensibilité des paramètres aux hypothèses de déploiement différenciées du véhicule électrique.....	12
<b>Annexe 7</b> : Conclusions de la revue critique.....	15

# ANNEXE 1 : QUALITÉ DES DONNÉES

TABLEAU 1 : QUALITÉ DES DONNÉES

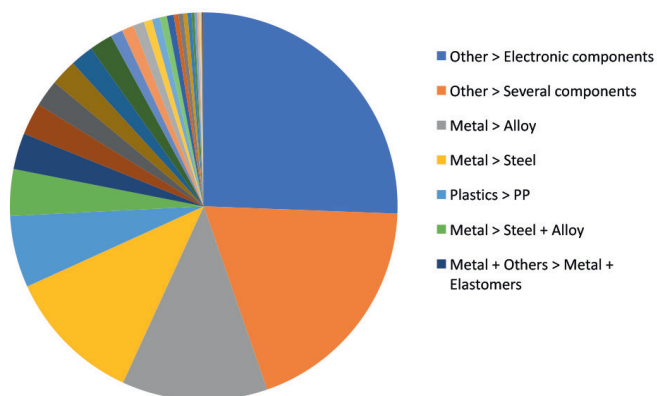
Hypothèses principales	Valeur / Commentaire
Durée de vie des véhicules	En 2015, la durée de vie moyenne d'un véhicule en France était de 9 ans, selon l'INSEE. L'étude a considéré une durée de vie moyenne de 10 ans afin de refléter l'augmentation tendancielle de la durée de vie d'ici à 2030. Les études ACV constructeurs France et ADEME (étude comparative VE/VT) prennent comme unité fonctionnelle de référence 150 000 km et 10 ans. Ces hypothèses ont été discutées et validées par le COPIL de l'étude.
Nombre de kilomètres parcourus par un véhicule	L'étude a pris en compte des kilométrages annuels de 15 000 km/an pour les citadines et 25 000 km/an pour les berlines. Ces données sont cohérentes avec les cotations de l'Argus français dans les conditions générales de la cote Argus des véhicules particuliers essence et diesel.
Archétypes de véhicules	L'ACV en 2016 est réalisée sur 8 véhicules présents sur le marché français sur la gamme citadine et berline. Ces véhicules sont anonymisés mais les caractéristiques sont présentées dans le chapitre 2.2.2. du rapport technique. En 2030, la composition matière des véhicules est supposée identique. Néanmoins, la projection modifie les performances des véhicules en accord avec les évolutions annoncées par les constructeurs automobiles et les technologies d'amélioration d'efficacité énergétique des véhicules thermiques.
Profils de roulage	Les profils de roulage ont été développés sur la base d'un sondage réalisé auprès des acquéreurs de véhicules en 2016 pour les deux segments de véhicules.
Mix électriques en 2030	Les hypothèses de compositions pour le mix électrique actuel ont été fournies par RTE (Mix RTE 2015). Pour 2030, les hypothèses sont issues du mix « RTE nouveau Mix 2030 », de l'ADEME « 100% ENR » avec un point d'étape à 2030 fourni par l'ADEME et un mix plus carboné développé par le consultant Carbone 4. Les inventaires par filière sont issus de Ecolinvent 3.2, aussi bien pour 2030 que pour l'ACV 2016.
Méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux	La méthodologie d'évaluation d'impact utilisée est CML 2001 en tenant compte de la sélection faite dans le référentiel français BPX30-323-0 pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation.
Gains d'efficacité énergétique	2% par an projetés d'ici à 2030. Périmètre matériaux – 2% par an sur matériaux fournisseurs (validé audit CAC 2016)
Consommation des véhicules et facteurs d'émissions associés	Pour les véhicules thermiques, les consommations des véhicules en 2016 sont issues du cycle de test NEDC auquel s'applique des facteurs de corrélation développés soit par le ICCT <sup>1</sup> , soit à partir du Handbook Emission Factors for Road Transport. Les consommations des véhicules électriques divergent en conduite réelle des valeurs d'homologation. À ce jour, il n'a pas été possible de quantifier avec exactitude la consommation électrique réelle qui dépend entre autres des profils de roulage, de la température externe, de l'utilisation des options du véhicule et des modes de conduite. La consommation électrique des véhicules dans l'étude est fondée sur les valeurs d'homologation auquel les auteurs ont appliqué un ratio de 24% qui correspond à la différence entre les NEDC 400 km de la Zoé et l'autonomie réelle annoncée par le constructeur +/- 300 km. Ce ratio se justifie à partir des profils de roulage qui, pour le cas de la citadine VE et des VHR favorisent les déplacements en ville, donc peu consommateurs. L'hypothèse intègre une part de récupération d'énergie au freinage. La logique est la même pour la part d'éclectique des VHR dont le moteur électrique est plus actif en mode urbain. Pour la berline VE, cela correspond au cycle d'homologation de l'EPA américain qui est proche des valeurs réelles d'utilisation. En 2030, les émissions des véhicules sont réputées être conformes à la norme Euro 6 et la législation Real world driving emissions (RDE).
Composition matière des véhicules et des batteries	La composition matière des véhicules provient de la base de données A2Mac1 et est publiée en annexe du rapport méthodologique. La composition matière des batteries est basée sur un des véhicules dont les données étaient disponibles (la citadine VE).
Parc automobile	Les caractéristiques du parc automobile actuel sont issues du ICCT (2015), CCFR (2015) and Eurostat (2015). Le parc automobile électrique est une donnée d'entrée des scénarios développée par Carbone 4.
Capacité d'échange d'énergie des batteries sur 10 ans	Travaux internes sur base de tests batteries chez Renault et Nissan fourni au consultant Carbone 4, et reflète une vision partagée des membres du groupe de pilotage.
Stocks de batterie en 2030	Le stock est issu des hypothèses de développement du parc automobile de la Stratégie de développement de la mobilité propre. <sup>2</sup>
Capacité des batteries	En 2030, l'hypothèse de croissance tendancielle est basée sur l'étude « Element Energy (2012) Costs and performance of EV batteries et sur l'étude Cambridge Econometrics (2015), En route pour un transport durable », Cambridge 2015. Certaines valeurs divergent des valeurs des études précitées. Des ajustements qui se comptent en unité de KWH ont été réalisés sur la base des annonces des constructeurs automobiles pour la production de véhicules électriques. Les autres hypothèses sont construites en s'inspirant des différenciations entre courte et longue autonomie en se différenciant de cette hypothèse centrale.

1 – [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_LaboratoryToRoad\\_2016.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LaboratoryToRoad_2016.pdf)  
 2 – <http://www.avare-france.org/Uploads/Documents/14781930796115a3b16cd9900eafbe0828903514a20-PPF-%20Strategie%20developpement%20mobilite%20propre.pdf>

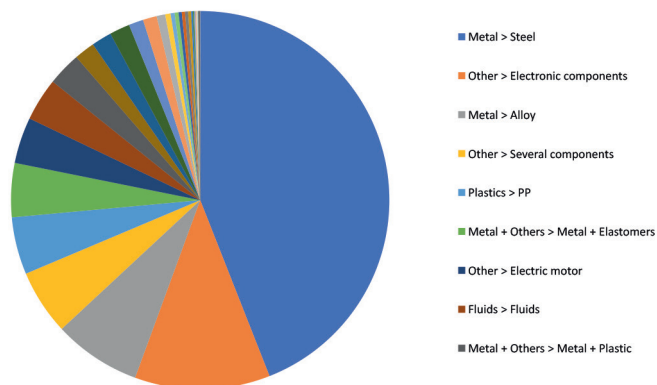
# ANNEXE 2 : COMPOSITION MATIÈRE DES VÉHICULES CONSIDÉRÉS

Figure 1 : Composition matière des citadines

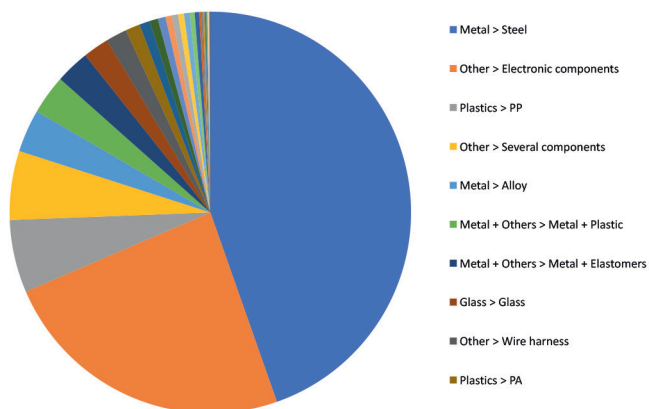
Citadine VE-REX



Citadine VHR



Citadine VE



Citadine VT

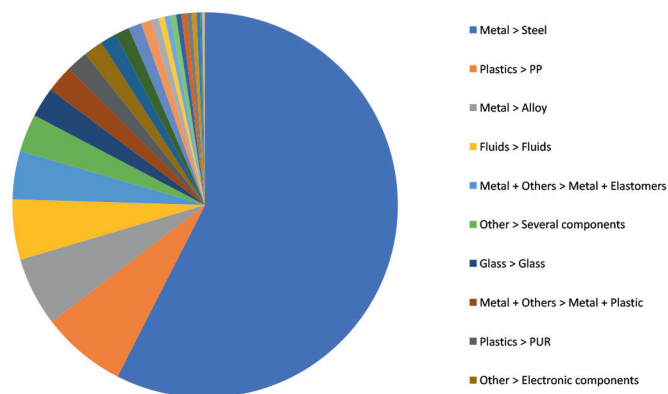
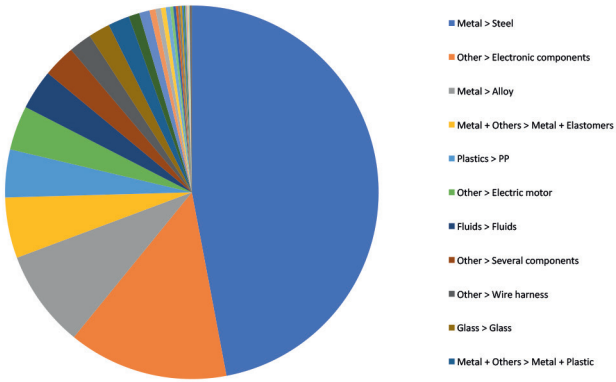
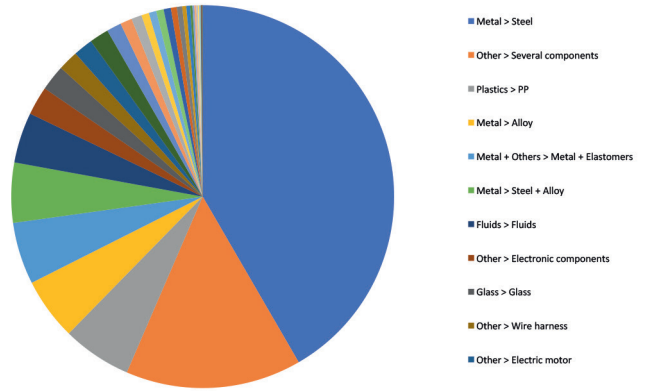


Figure 2 : Composition matière des berlines

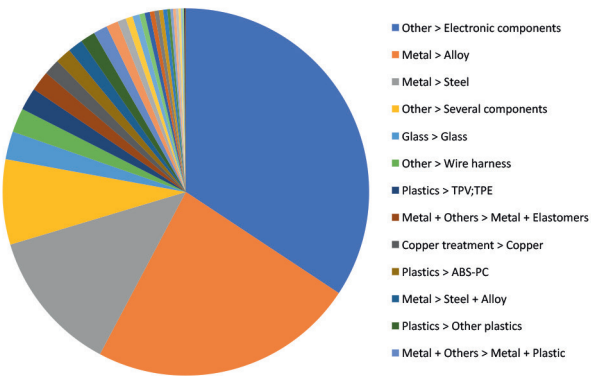
Berline VHR



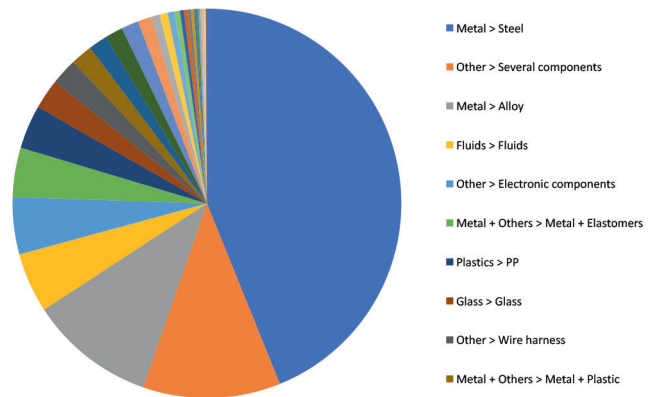
Berline VT



Berline VE



SUV-4X4 VHR





## ANNEXE 3 : OPÉRATIONS DE MAINTENANCE

Operation	Life cycle frequency according to Renault recommendations (Thermal vehicle)	Life cycle frequency according to Renault recommendations (Electric vehicle)
Air-conditioning fluid change	1	1
Pb-battery change	1	1
Brake fluid change	1	1
Cooling fluid change	1	1
Windscreen washing liquid change	4	4
Drain	7	0
Tire change	3	3

En ce qui concerne le lavage des véhicules, comme tous les lavages sont les mêmes d'un produit à l'autre, la consommation d'eau n'est pas considérée dans le calcul des impacts et n'est pas considérée dans cette ACV.

# ANNEXE 4 : INDICATEURS D'IMPACTS 2016-2030 DES 8 VÉHICULES

## a) Épuisement des ressources fossiles

Résultats exprimés en GJ, pour les 8 véhicules et à l'échelle d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques (dont 2/3 de VHR) (en GJ par véhicule et en PJ pour le parc).

TABLEAU 3 : CONSOMMATION DES RESSOURCES FOSSILES - INDICATEUR D'IMPACT 2016-2030 DES VÉHICULES

		Production phase	Production phase battery	Use Phase	End of life	End of life battery	Recycling credits	Recycling credits of battery	Total hors crédits
Citadine - VT	2016	75	-	411	2	-	-17	-	488
	2030	57	2	238	2	0	-17	-1	299
Citadine - VHR	2016	90	17	128	2	2	-20	-6	239
	2030	68	12	62	2	1	-20	-5	145
Citadine - VE-REX	2016	89	33	70	2	3	-22	-12	197
	2030	67	26	41	2	3	-22	-11	139
Citadine - VE	2016	70	39	22	2	4	-12	-14	137
	2030	53	37	26	2	4	-12	-15	122
Berline - VT	2016	87	-	532	2	-	-17	-	621
	2030	65	4	360	2	1	-17	-2	432
Berline - VHR	2016	57	20	223	2	2	-23	-7	304
	2030	43	12	102	2	1	-23	-4	160
Berline - VE	2016	140	70	61	4	7	-46	-25	282
	2030	106	42	69	4	5	-46	-16	226
SUV-4X4 - VHR	2016	162	11	472	4	1	-37	-4	650
	2030	122	13	186	4	0	-37	-2	325

TABLEAU 4 : CONSOMMATION DE RESSOURCES FOSSILES INDICATEUR D'IMPACT DU PARC ÉLECTRIQUE

	Production, fin de vie et crédits	Usage
Citadine - VHR	49	51
Citadine - VE-REX	53	34
Citadine - VE	56	21
Berline - VHR	40	132
Berline - VE	60	44

## b) Potentiel de réchauffement global

Résultats de l'ACV exprimés en tCO<sub>2</sub>-eq. par véhicule et en MtCO<sub>2</sub> eq. pour le parc.

TABLEAU 5 : CONTRIBUTION AU RÉCHAUFFEMENT GLOBAL - INDICATEUR D'IMPACT 2016-2030 DES VÉHICULES									
		Production phase	Production phase battery	Use Phase	End of life	End of life battery	Recycling credits	Recycling credits of battery	Total hors crédits
Citadine - VT	2016	6,2	-	26,5	0,5	-	-1,1	-	33,2
	2030	4,7	0,2	15,4	0,5	0,0	-1,1	-0,1	20,8
Citadine - VHR	2016	7,3	1,6	13,4	0,7	0,1	-1,3	-0,7	23,1
	2030	5,5	1,2	5,9	0,7	0,1	-1,3	-0,6	13,4
Citadine - VE-REX	2016	7,3	3,1	7,1	0,6	0,2	-1,5	-1,3	18,3
	2030	5,5	2,4	3,5	0,6	0,2	-1,5	-1,2	12,2
Citadine - VE	2016	5,8	3,7	2,1	0,4	0,3	-0,7	-1,5	12,3
	2030	4,4	3,5	1,8	0,4	0,3	-0,7	-1,6	10,4
Berline - VT	2016	7,1	-	38,4	0,6	-	-1,3	-	46,1
	2030	5,3	0,4	26,1	0,6	0,0	-1,3	-0,2	32,4
Berline - VHR	2016	4,1	1,9	27,4	0,8	0,2	-1,6	-0,8	34,4
	2030	3,1	1,1	10,6	0,8	0,1	-1,6	-0,5	15,7
Berline - VE	2016	12,1	6,6	6,0	0,9	0,5	-3,9	-2,7	26,1
	2030	9,1	4,0	5,2	0,9	0,3	-3,9	-1,8	19,5
SUV-4X4 - VHR	2016	13,0	1,0	40,9	1,1	0,1	-2,4	-0,4	56,1
	2030	9,8	1,2	15,3	1,1	0,0	-2,4	-0,2	27,4

TABLEAU 6 : CONTRIBUTION AU RÉCHAUFFEMENT GLOBAL - INDICATEUR D'IMPACT DU PARC ÉLECTRIQUE		
	Production, fin de vie et crédits	Usage
Citadine - VHR	5	5
Citadine - VE-REX	5	3
Citadine - VE	5	2
Berline - VHR	4	14
Berline - VE	6	3

### c) Potentiel d'acidification

Résultats de l'ACV exprimés en kg SO<sub>2</sub>-eq. par véhicule et en kt SO<sub>2</sub>-eq. pour le parc.

TABLEAU 7 : POTENTIEL D'ACIDIFICATION - INDICATEUR D'IMPACT 2016-2030 DES VÉHICULES									
		Production phase	Production phase battery	Use Phase	End of life	End of life battery	Recycling credits	Recycling credits of battery	Total hors crédits
Citadine - VT	2016	23	-	38	2	-	-6	-	63
	2030	17	2	23	2	0,1	-6	-1	44,1
Citadine - VHR	2016	25	15	17	3	0,6	-7	-6	60,6
	2030	19	14	11	3	0,5	-7	-5	47,5
Citadine - VE-REX	2016	28	29	12	3	1,1	-8	-11	73,1
	2030	21	28	9	3	1,0	-8	-11	62
Citadine - VE	2016	19	34	7	2	1,3	-3	-14	63,3
	2030	14	40	7	2	1,4	-3	-15	64,4
Berline - VT	2016	31	-	62	2	-	-7	-	95
	2030	23	3	43	2	0,2	-7	-2	71,2
Berline - VHR	2016	36	18	31	3	0,7	-8	-7	88,7
	2030	27	12	20	3	0,4	-8	-4	62,4
Berline - VE	2016	43	62	21	6	2,3	-20	-24	134,3
	2030	32	43	20	6	1,5	-20	-16	102,5
SUV-4X4 - VHR	2016	42	10	55	5	0,4	-12	-4	112,4
	2030	32	13	31	5	0,2	-12	-2	81,2

TABLEAU 8 : POTENTIEL D'ACIDIFICATION - INDICATEUR D'IMPACT DU PARC ÉLECTRIQUE		
	Production, fin de vie et crédits	Usage
Citadine - VHR	19	9
Citadine - VE-REX	28	7
Citadine - VE	33	6
Berline - VHR	39	26
Berline - VE	30	13

## d) Potentiel d'acidification

Résultats de l'ACV exprimés en kg PO4-eq. par véhicule et en kt PO4-eq. pour le parc.

TABLEAU 9 : POTENTIEL D'EUTROPHISATION - INDICATEUR D'IMPACT 2016-2030 DES VÉHICULES									
		Production phase	Production phase battery	Use Phase	End of life	End of life battery	Recycling credits	Recycling credits of battery	Total hors crédits
Citadine - VT	2016	2,1	-	5,3	0,13	-	-0,30	-	12,87
	2030	1,6	0,3	3,3	0,13	0,01	-0,30	-0,04	13,28
Citadine - VHR	2016	2,6	2,2	2,9	0,19	0,05	-0,36	-0,23	13,48
	2030	1,9	0,9	2,5	0,19	0,05	-0,36	-0,21	14,61
Citadine - VE-REX	2016	2,5	4,2	2,1	0,17	0,10	-0,40	-0,45	15,14
	2030	1,9	1,9	2,0	0,17	0,10	-0,40	-0,43	14,5
Citadine - VE	2016	1,9	5,1	1,2	0,11	0,12	-0,18	-0,54	14,47
	2030	1,4	2,7	1,7	0,11	0,13	-0,18	-0,58	22,7
Berline - VT	2016	2,6	-	13,9	0,16	-	-0,33	-	29,14
	2030	1,9	0,5	9,9	0,16	0,02	-0,33	-0,07	22,36
Berline - VHR	2016	1,7	2,6	5,3	0,22	0,06	-0,43	-0,28	16,94
	2030	1,3	0,9	4,6	0,22	0,04	-0,43	-0,17	24,53
Berline - VE	2016	3,8	9,1	4,1	0,25	0,22	-1,01	-0,97	29,06
	2030	2,8	3,2	5,2	0,25	0,14	-1,01	-0,63	26,13
SUV-4X4 - VHR	2016	4,3	1,4	8,5	0,31	0,03	-0,65	-0,15	25,37
	2030	3,2	1,0	6,3	0,31	0,02	-0,65	-0,07	10,83

TABLEAU 10 : POTENTIEL D'EUTROPHISATION - INDICATEUR D'IMPACT DU PARC ÉLECTRIQUE		
	Production, fin de vie et crédits	Usage
Citadine - VHR	2,1	2,1
Citadine - VE-REX	2,6	1,7
Citadine - VE	2,9	1,4
Berline - VHR	2,4	5,9
Berline - VE	3,1	3,3

### e) Potentiel de création d'ozone photochimique

Résultats de l'ACV exprimés en kg C2H4-eq. par véhicule et en kt C2H4-eq. pour le parc).

TABLEAU 11 : POTENTIEL DE CRÉATION D'OZONE PHOTOCHIMIQUE - INDICATEUR D'IMPACT 2016-2030 DES VÉHICULES									
		Production phase	Production phase battery	Use Phase	End of life	End of life battery	Recycling credits	Recycling credits of battery	Total hors crédits
Citadine - VT	2016	2,7	-	9,1	0,13	-	-0,37	-	19,67
	2030	2,1	0,1	5,4	0,13	0,01	-0,37	-0,06	15,38
Citadine - VHR	2016	3,0	0,9	3,5	0,19	0,05	-0,45	-0,40	12,58
	2030	2,2	0,7	1,8	0,19	0,05	-0,45	-0,35	11,93
Citadine - VE-REX	2016	3,1	1,7	1,9	0,19	0,10	-0,51	-0,78	12,18
	2030	2,3	1,5	1,1	0,19	0,10	-0,51	-0,74	10,64
Citadine - VE	2016	2,5	2,0	0,7	0,13	0,12	-0,23	-0,93	10,31
	2030	1,9	2,1	0,6	0,13	0,13	-0,23	-1,00	15,83
Berline - VT	2016	3,3	-	7,5	0,17	-	-0,41	-	19,16
	2030	2,5	0,2	5,3	0,17	0,02	-0,41	-0,12	18,07
Berline - VHR	2016	2,3	1,0	6,3	0,22	0,06	-0,54	-0,48	15,44
	2030	1,7	0,7	2,9	0,22	0,04	-0,54	-0,29	17,87
Berline - VE	2016	5,9	3,6	2,2	0,39	0,22	-1,22	-1,67	21,44
	2030	4,4	2,3	1,9	0,39	0,14	-1,22	-1,09	27,2
SUV-4X4 - VHR	2016	6,2	0,6	10,9	0,34	0,03	-0,82	-0,26	28,33
	2030	4,7	0,7	4,5	0,34	0,02	-0,82	-0,12	10,26

TABLEAU 12 : POTENTIEL DE CRÉATION D'OZONE PHOTOCHIMIQUE - IMPACT DU PARC ÉLECTRIQUE		
	Production, fin de vie et crédits	Usage
Citadine - VHR	2,0	1,4
Citadine - VE-REX	2,4	0,9
Citadine - VE	2,5	0,5
Berline - VHR	2,3	3,8
Berline - VE	3,2	1,2

# ANNEXE 5 : SERVICES AU SYSTÈME ÉLECTRIQUE PAR SCÉNARIO ET PAR TYPE DE VÉHICULE

Figure 3 : Services au système électrique : potentiel dans le scénario 1  
Ambition transition énergétique

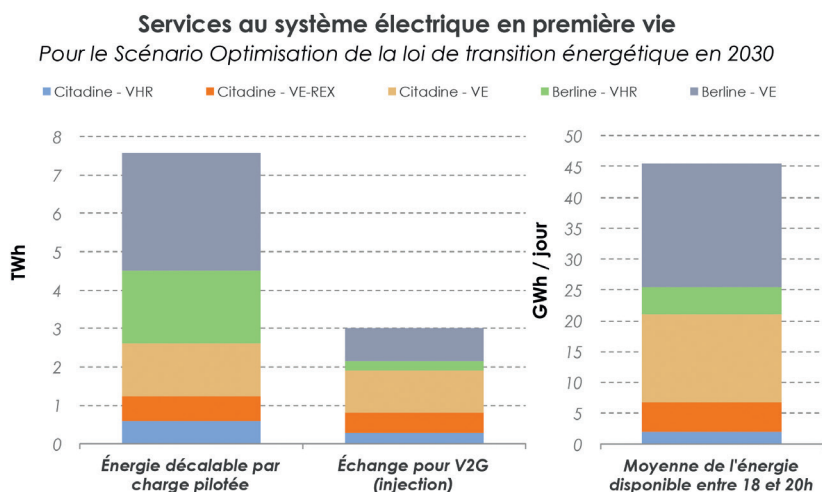


Figure 4 : Services au système électrique: potentiel dans le scénario 2  
Accélération énergies renouvelables

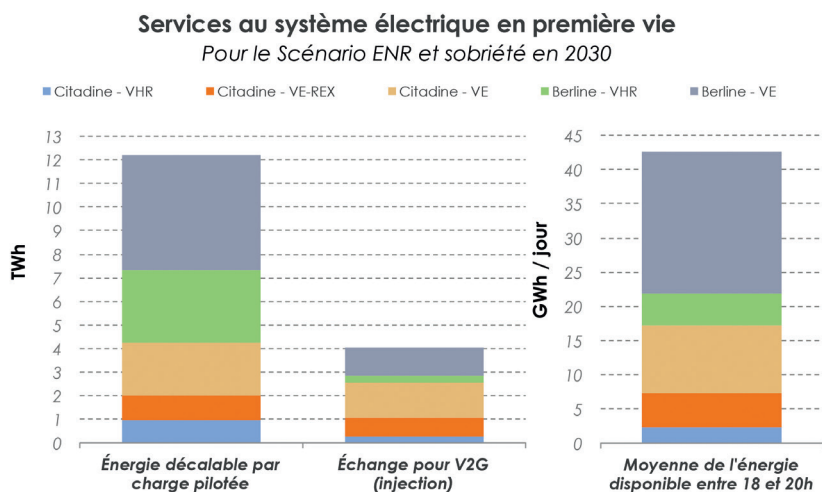
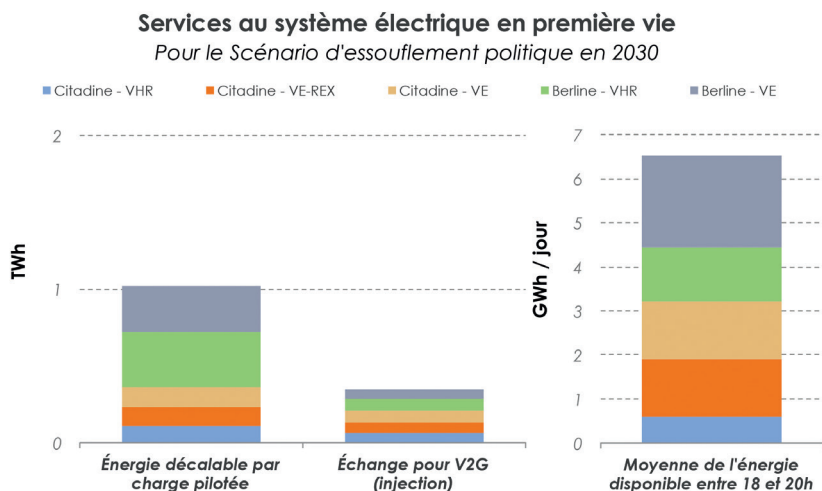


Figure 5 : Services au système électrique: potentiel dans le scénario 3  
Renoncement politique



# ANNEXE 6 : SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES AUX HYPOTHÈSES DE DÉPLOIEMENT DIFFÉRENCIÉES DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

## a) Sensibilité au mix électrique

TABLEAU 13 : ÉVOLUTION DES INDICATEURS PAR RAPPORT AU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (MIX TRANSITION ÉNERGÉTIQUE)					
Variation entre le Mix Transition énergétique et le mix Vers 100% ENR	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
Citadine - VHR	-2%	-2%	-2%	-3%	-1%
Citadine - VE-REX	-3%	-2%	-2%	-3%	-1%
Citadine - VE	-4%	-2%	-3%	-4%	-1%
Berline - VHR	-5%	-3%	-3%	-5%	-1%
Berline - VE	-6%	-4%	-4%	-5%	-2%
<b>Baisse maximale</b>	<b>-6%</b>	<b>-4%</b>	<b>-4%</b>	<b>-5%</b>	<b>-2%</b>
Variation entre le Mix Transition énergétique et le Mix carboné					
Citadine - VHR	8%	3%	5%	-1%	1%
Citadine - VE-REX	10%	3%	6%	-1%	2%
Citadine - VE	12%	3%	8%	-1%	2%
Berline - VHR	15%	4%	8%	-1%	3%
Berline - VE	19%	5%	13%	-1%	3%
<b>Hausse Maximale</b>	<b>19%</b>	<b>5%</b>	<b>13%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>



## b) Sensibilité à l'évolution des batteries

Impacts relatifs sur l'ensemble du cycle de vie (crédits de recyclage inclus) par rapport à l'hypothèse de référence (croissance de l'efficacité énergétique).

Variation entre HYP 1 (+ d'efficacité) et HYP2 (croissance maximale)	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
Citadine - VHR	5%	20%	5%	11%	8%
Citadine - VE-REX	12%	30%	11%	21%	15%
Citadine - VE	5%	11%	5%	8%	7%
Berline - VHR	4%	11%	3%	8%	6%
Berline - VE	6%	14%	6%	9%	7%
<b>Hausse maximale</b>	<b>12%</b>	<b>30%</b>	<b>11%</b>	<b>21%</b>	<b>15%</b>
Variation entre HYP 1 et HYP3					
Citadine - VHR	-1%	-3%	-1%	-2%	-1%
Citadine - VE-REX	-2%	-6%	-2%	-4%	-3%
Citadine - VE	-11%	-23%	-11%	-17%	-14%
Berline - VHR	-1%	-3%	-1%	-2%	-1%
Berline - VE	-3%	-7%	-3%	-4%	-3%
<b>Baisse Maximale</b>	<b>-11%</b>	<b>-23%</b>	<b>-11%</b>	<b>-17%</b>	<b>-14%</b>

## c) Sensibilité à l'évolution du recyclage

Variation HYP 1 (50%)– HYP 2 (70%)	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
Citadine - VHR	-2%	-6%	-2%	-2%	-3%
Citadine - VE-REX	-4%	-10%	-5%	-3%	-8%
Citadine - VE	-6%	-12%	-8%	-4%	-11%
Berline - VHR	-1%	-3%	-1%	-1%	-2%
Berline - VE	-4%	-10%	-5%	-3%	-6%
<b>Hausse maximale</b>	<b>-6%</b>	<b>-12%</b>	<b>-8%</b>	<b>-4%</b>	<b>-11%</b>
Variation HYP 1 – HYP 2					
Citadine essence – Mild-Hybrid	0%	-2%	0%	-1%	-1%
Citadine - VHR	-3%	-10%	-4%	-3%	-6%
Citadine - VE-REX	-7%	-17%	-9%	-6%	-13%
Citadine - VE	-11%	-21%	-14%	-8%	-19%
Berline diesel – Mild-Hybrid	0%	-2%	0%	0%	-1%
Berline - VHR	-2%	-6%	-2%	-2%	-4%
Berline - VE	-7%	-17%	-9%	-4%	-11%
<b>Baisse maximale</b>	<b>-11%</b>	<b>-21%</b>	<b>-14%</b>	<b>-8%</b>	<b>-19%</b>

#### d) Sensibilité des résultats à la composition du parc automobile

TABLEAU 16 : INDICATEURS D'IMPACT SELON LE TAUX DE VHR ET SELON LES PHASES DU CYCLE DE VIE À L'ÉCHELLE D'UN PARC DE 4,4 MILLIONS DE VÉHICULES DANS LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE					
	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
67% de VHR					
PRODUCTION & FDV	404,5	228,9	36,1	16,7	17,6
USAGE	282,2	61,1	26,2	14,3	7,8
<b>TOTAL</b>	<b>686,8</b>	<b>289,9</b>	<b>62,3</b>	<b>31,0</b>	<b>25,4</b>
50% de VHR					
PRODUCTION & FDV	437,9	247,4	39,3	18,3	19,4
USAGE	260,9	60,0	23,3	14,3	7,1
<b>TOTAL</b>	<b>698,8</b>	<b>307,4</b>	<b>62,6</b>	<b>32,5</b>	<b>26,5</b>
25% de VHR					
PRODUCTION & FDV	487,9	275,1	44,1	20,7	22,1
USAGE	228,9	58,5	18,9	14,2	6,1
<b>TOTAL</b>	<b>716,8</b>	<b>333,6</b>	<b>63,0</b>	<b>34,9</b>	<b>28,2</b>
0% de VHR					
PRODUCTION & FDV	537,9	302,9	48,8	23,0	24,7
USAGE	196,9	57,0	14,5	14,1	5,1
<b>TOTAL</b>	<b>734,8</b>	<b>359,9</b>	<b>63,4</b>	<b>37,2</b>	<b>29,8</b>

#### e) Sensibilité à l'évolution de la consommation unitaire des moteurs thermiques

TABLEAU 17 : SENSIBILITÉ DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX À L'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION UNITAIRE DES VÉHICULES À L'USAGE					
Variation de 0 à -40% de CU	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
Citadine – Mild-hybrid	61%	41%	57%	39%	51%
Citadine - VHR	14%	5%	16%	4%	10%
Citadine - VE-REX	17%	4%	20%	4%	11%
Berline – Mild-Hybrid	42%	30%	40%	33%	29%
Berline - VHR	31%	8%	38%	8%	22%
<b>Hausse Maximale</b>	<b>61%</b>	<b>41%</b>	<b>57%</b>	<b>39%</b>	<b>51%</b>

f) Sensibilité à l'évolution du nombre de batteries

TABLEAU 18 : SENSIBILITÉ DES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX À L'ÉVOLUTION DU NOMBRE DE BATTERIE(S) UTILISÉE(S) EN PREMIÈRE VIE					
Variation de 1 à 1,2 batterie	(ADP fossil) [MJ]	(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq.]	(GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	(EP) [kg PO <sub>4</sub> -eq.]	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.]
Citadine - VHR	1%	5%	1%	3%	2%
Citadine - VE-REX	3%	9%	3%	6%	4%
Citadine - VE	5%	11%	5%	8%	7%
Berline - VHR	1%	3%	1%	2%	2%
Berline - VE	4%	9%	4%	5%	4%
<b>Hausse Maximale</b>	<b>5%</b>	<b>11%</b>	<b>5%</b>	<b>8%</b>	<b>7%</b>
Variation de 1 à 1,5 batteries					
Citadine - VHR	4%	13%	3%	7%	5%
Citadine - VE-REX	8%	21%	8%	15%	11%
Citadine - VE	14%	28%	13%	21%	17%
Berline - VHR	3%	8%	3%	6%	4%
Berline - VE	9%	21%	9%	13%	10%
<b>Hausse Maximale</b>	<b>14%</b>	<b>28%</b>	<b>13%</b>	<b>21%</b>	<b>17%</b>

# ANNEXE 7 : RAPPORT DE REVUE CRITIQUE

Gingko 21 – 21 novembre 2017

## *Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ? Analyse de cycle de vie*

### 1. Introduction

La Fondation pour la Nature et pour l'Homme (FNH) et la European Climate Foundation (ECF) ont souhaité réaliser une étude prospective sur la contribution possible du véhicule électrique à la transition énergétique en France. L'étude a été réalisée par la FNH, la ECF et Carbone 4 à partir d'une étude ACV réalisée par Renault. L'étude étant comparative entre différents scénarios prospectifs, et destinée à être publiée, la FNH a souhaité la soumettre à un panel de revue critique afin d'en fiabiliser les résultats et d'en assurer la conformité avec les normes ISO 14040 et ISO 14044 relatives à l'ACV. Un panel de revue critique rassemblant des compétences complémentaires a été constitué, ce panel a revu le rapport d'étude et rédigé le présent Rapport de revue critique, qui a vocation à être intégré, en intégralité et avec ses annexes, au rapport final d'étude.

### 2. Comité de revue critique

Le panel de revue critique a rassemblé :

- Philippe Osset, fondateur de Solinnen, expert ACV, assisté de Delphine Bauchot et de Cécile Beaudard,
- Céline Cluzel, Directeur associé chez Element Energy, experte énergie,
- Jérôme Payet, fondateur de Cycleco, expert ACV,
- Hélène Teulon, ingénieur, fondatrice de Gingko 21, experte ACV.

Hélène Teulon a présidé le panel.

### 3. Objectif de la revue critique

L'objectif de cette revue critique est

- de conforter les résultats de l'étude, menée sur une technologie émergente, et dans une démarche prospective,
- de vérifier la conformité de l'étude avec les normes ISO 14040 et ISO 14044, dans la mesure où l'étude est comparative et destinée à être publiée - ISO 14044 :2006, 6.1 dernier alinéa : dans le cas d'une « affirmation comparative destinée à être divulguée au public », la revue critique doit être réalisée par un « panel de parties intéressées ».

### 4. Périmètre de la revue critique

Cette revue critique comprend :

- une validation de la méthodologie de l'analyse de cycle de vie et une vérification de la conformité de l'étude avec les normes ISO14040 et ISO 14044,
- une vérification de la cohérence interne du rapport, notamment de la cohérence entre les résultats des calculs et les conclusions de l'étude, en regard des objectifs.
- la revue des données utilisées – par sondage.

La revue critique ne couvre pas la revue systématique des calculs. Leur exactitude reste sous la seule responsabilité des auteurs de l'étude.

### 5. Processus de revue critique

*Remarque préalable :*

*Il est à noter que l'étude n'est pas une étude ACV classique, mais qu'elle s'appuie sur les résultats d'une étude ACV pour tester l'impact du déploiement de véhicules électriques à l'échelle du parc français, avec des effets sur la production d'électricité. Les calculs relatifs aux simulations prospectives sur le parc automobile ont été réalisés par ECF et Carbone 4 – avec excel et des données Ecoinvent – et s'appuient sur une première étude ACV du véhicule électrique réalisée par Renault en 2016 sur le logiciel Gabi. Le fait que les deux études aient été réalisées sur des outils différents et par des acteurs différents a complexifié l'étude et les échanges. Les experts ont eu accès aux deux études.*

La revue critique a été initiée après la réalisation de l'étude, et s'est déroulée de mai à novembre 2017. En raison de la complexité de l'étude, le processus s'est articulé en trois temps :

- une analyse approfondie du rapport d'étude et des résultats a donné lieu à la rédaction par le panel d'experts d'une série de commentaires et de questions. Ces points ont été discutés lors d'une réunion rassemblant tous les acteurs. A l'issue de cette réunion, les auteurs ont modifié certains éléments du calcul et rédigé une nouvelle version du rapport. Les auteurs ont également répondu formellement à tous les commentaires/questions,
- le second rapport a été soumis aux experts, qui ont

émis de nouveaux commentaires et questions, les auteurs ont répondu aux questions et adapté le rapport en fonction des recommandations du panel,

- une dernière revue, plus rapide, a permis de converger vers la version définitive du rapport et la rédaction du rapport de revue critique.

Le processus de revue critique, coopératif et fructueux, a permis d'améliorer sensiblement la qualité du rapport final, et de renforcer la crédibilité des résultats de l'étude.

En particulier, les points suivants ont fait l'objet de discussions et ont conduit à l'amélioration du rapport :

- Respect du formalisme des rapports d'ACV selon les normes ISO 14040 et suivantes
- Définition de l'objectif et du périmètre de l'étude,
- Clarification des hypothèses et des données utilisées,
- Evolution de certaines valeurs et hypothèses,
- Frontières du système, notamment pour le scénario prospectif,
- La rédaction du rapport en général.

## 6. Conclusions de la revue critique

*Le présent rapport est livré par le panel à la FNH. Le panel ne peut pas être tenu pour responsable de l'usage de son travail par des tiers. Les conclusions du panel couvrent l'ensemble des éléments présentés par FNH, tels que mentionné plus haut, et aucun autre rapport, extrait, publication ou généralisation de tout type qui pourrait être fait. Les conclusions du panel ont été données dans le cadre de l'état de l'art courant, et de l'information qu'il a reçu au cours de son travail. Ces conclusions auraient pu être différentes dans un contexte différent.*

L'étude répond dans l'ensemble aux exigences et recommandations des normes ISO 14040 et 14044.

- Le rapport est relativement clair, complet et transparent ;
- Le champ et les objectifs de l'étude sont clairement exposés dans le rapport ;
- Les hypothèses de calcul et les choix méthodologiques sont transparents et argumentés ; les limites de l'étude sont bien mentionnées ;
- Des analyses de sensibilité permettent de tester la robustesse des résultats à l'évolution de certaines hypothèses ;
- Les conclusions exposées sont cohérentes avec les résultats des calculs, elles sont modérées et tiennent compte des limites de l'étude.

Un gros travail a été réalisé par la FNH, ECF et Carbone 4 pour l'amélioration de l'étude au cours du processus de revue critique, en particulier sur le rapport méthodologique : l'exposé des objectifs a été clarifié, les hypothèses et limites ont été précisées.

Concernant la dimension prospective de l'étude à l'horizon 2030, des efforts substantiels ont été faits pour prévoir la variabilité des résultats possibles. Néanmoins, le nombre de paramètres à prendre en considération est considérable et les contraintes de temps et de ressource liées à l'élaboration du rapport ont, semble-t-il, limité le champ de l'exploration de la variabilité. Il est louable que les auteurs fassent preuve d'une grande transparence concernant ces limites.

Dans l'ensemble, les membres du panel considèrent que le niveau de qualité de cette étude est correct.

Les analyses de sensibilité réalisées ainsi que le travail conduit pendant la revue critique conduisent à confirmer la crédibilité des résultats.

Les conclusions de l'étude sont pertinentes dans le cadre défini par l'étude – l'hypothèse de référence est l'atteinte des objectifs politiques affichés par le gouvernement.

Au regard de la masse de connaissances explorée et utilisée dans cette étude, la partie prospective du travail a permis d'explorer un grand nombre d'hypothèses de mobilité avec des véhicules électriques. Les principaux éléments susceptibles d'affecter le développement des véhicules électriques et hybrides sont en partie identifiés. Les limites mentionnées par les auteurs sont à juste titre présentées comme des pistes restant à explorer.

En ce sens, le rapport apporte assurément des éléments constructifs sur une vision prospective de la mobilité électrique et ouvre des voies à explorer pour une optimisation future de cette mobilité.

Les principales limitations de l'étude sont :

- L'absence d'indicateur « épuisement des ressources minérales » : même si les raisons de l'absence de l'indicateur sont explicitées dans le rapport méthodologique, il nous semble que le calcul d'un tel indicateur aurait été nécessaire pour répondre complètement aux objectifs de l'étude et apporter des éléments répondant aux interrogations publiques concernant l'épuisement des ressources engendré par les batteries. Des études précédentes concernant des véhicules avec les motorisations étudiées ici, notamment pour l'ADEME, considèrent cet indicateur et démontrent que cet indicateur est riche d'enseignement. Les récents travaux du JRC proposent également des indicateurs pour cet impact.
- La méthodologie et les outils utilisés pour l'évaluation : comme cela a été indiqué en remarque préa-

lable, les deux niveaux d'évaluation (Renault - 2016 sur le logiciel Gabi puis ECF et Carbone 4 - projection sur Excel/données EcoInvent) constituent une limite pour l'interprétation des résultats, notamment pour repérer la contribution des différentes étapes et procédés. Il aurait été préférable de tout réaliser dans un même et unique logiciel et une même base de données pour éviter ce biais. Néanmoins, sur la base des discussions avec les auteurs, le biais n'est pas significatif de manière à remettre en question les conclusions de l'étude.

- Les contraintes de temps et de ressource liées à l'élaboration du rapport : les contraintes techniques ont amenées à exclure du champ de l'étude divers éléments comme le reconditionnement des batteries en seconde vie, le taux de perte de batteries entre la première et la seconde vie, la construction des infrastructures du réseau électrique nécessaire à l'installation des bornes de recharge par exemple. L'exclusion de ces éléments du champ de l'étude est de nature à introduire un biais conduisant à une sous-estimation des impacts des véhicules électriques. Même si ces éléments influencent a priori de système de façon mineure, il eut été préférable de tester ces paramètres à travers des analyse de sensibilité afin de valider leur moindre importance.

Les principales recommandations du panel à l'issue du processus de revue critique sont présentées dans la section suivante.

La principale limitation à la revue est l'absence d'exi-

gence dans les normes de référence spécifiques à la façon de réaliser des choix dans le cadre de travaux d'ACV « prospectifs » ou « futurs » (deux termes absents d'ISO 14044), notamment dans le contexte contraint de temps et de ressources des praticiens mentionné plus haut. Ainsi, sur ces points, c'est l'expertise du membre du panel en charge de revoir ces aspects qui a servi de référence.

## 7. Recommandations du panel

Les principales recommandations à l'issue du processus de revue critique concernent :

- Formalisme des normes ISO 14040 et suivantes :
  - > Identifier les omissions éventuelles d'étapes, préciser le traitement des données manquantes, préciser les méthodes de calcul des indicateurs d'impact, établir une relation lors de l'interprétation des résultats avec l'objectif et le périmètre.
- Méthodologie :
  - > Intégrer une évaluation de l'indicateur « épuisement des ressources minérales »,
  - > Prendre en compte une hypothèse de durée de vie réduite de batterie en seconde vie,
  - > Prendre en compte les pertes à la charge, les travaux relatifs à l'infrastructure des réseaux électriques, le reconditionnement des batteries en seconde vie, ainsi que les compétitions d'usage des batteries en seconde vie – autant de limites qui sont maintenant mentionnées dans le rapport.

## Détail des points discutés pendant la revue critique

Les paragraphes ci-après présentent les points les plus significatifs des échanges entre **FNH, ECF et carbone 4** [les auteurs] et le panel de revue critique [le panel].

Chaque question ou commentaire est précédé du numéro de page (du rapport provisoire) et du rapport concerné (M pour Méthodologique et R pour Résultats) . Les thèmes sont classés dans l'ordre des pages du rapport.

### Page 1 rapport M - Sommaire -

- Panel : Le plan proposé par la norme ISO 14044 chap 5.2 pour les rapports tierce partie n'est pas respecté Il est très approprié de suivi le plan de la norme. A défaut, l'ensemble des points qui y sont demandés doivent être présents.
- Réunion : Solinnen va préciser ce qui manque.
- Auteurs : Solinnen a envoyé les détails du plan.Tous

les éléments sont disponibles pour avancer sur un nouveau plan, qui sera partagé avec les experts la dernière semaine de juillet. Document en cours

- Panel : Non, il manque encore des éléments [cf onglet : elements attendus par la norme]
- Auteurs : OK à vérifier dans l'onglet dédié.
- Panel : ok

### Rapport M - Général

- Panel : L'ACV 2016 a été conduit à partir de données spécifiques et de base de données thinkstep. Selon ce qui est dit dans le rapport méthodologique, Carbone 4 semble avoir utilisé des données ecoinvent pour les différentes énergies considérées. Il y a donc un risque de biais, d'incohérence dans les données utilisées. Je pense que ce point a été identifié au début des travaux et traité mais cela ne figure pas dans les rapports (n'a pas forcément lieu

d'être). En revanche, nous aimerions avoir le retour de Carbone 4 sur ce point pour nous assurer que ce risque a été géré.

- Auteurs : Effectivement l'ACV 2016 est fondée sur l'impact de la consommation d'électricité (le FE, le facteur d'émissions) qui est dans GaBi (et donc pour moi c'est une boîte noire, je ne connais pas la source du FE, à quelle mix électrique ça correspond, si c'est une moyenne sur plusieurs années etc.)
  - > Comme en France il y a eu un travail important visant à réviser les valeurs du FE pour les différents usages de l'électricité dans le bâtiment neuf (afin de préfigurer un référentiel qui deviendra norme), il m'a semblé opportun de prendre ces travaux comme donnée d'entrée, vu que c'est a priori ce qu'il y a de plus récent disponible. Et ça vient donc de EcoInvent (re-traité par un autre cabinet, RDC Environnement).
  - > Le risque de biais est modéré : entre la valeur du FE de GaBi (que je peux déduire en retro-engineering) et celle d'un mix moyen avec les FE EcoInvent, il y a ~ 2 g CO2 d'écart, sur un total d'environ 96, donc bien peu in fine.
- Panel : La revue critique prend note du retour de l'auteur de l'étude. Des lors que le biais est limité, les conséquences sur l'étude ne sont pas significatives.

#### **Rapport M - Tous les tableaux -**

- Panel : La qualité et source des données ne sont pas assez explicites. Par exemple, dans les tableaux, précisez par un code couleur et une légende du code couleur, les données issues des sources et les données calculées ou extrapolées. Précisez les formules de calculs utilisées si possible.
  - Réunion : OK
  - Auteurs : Modifications apportées dans le rapport 2. Comment justifier de la qualité des sources? Cf autres rapports? Vérifier la proposition faite dans les chapitres 4 et 5.
  - Panel : Il manque les éléments relatifs à la qualité de données, aussi bien les exigences de qualité de données attendues pour répondre aux objectifs et champs de l'étude (ISO 14044 chapitre 4.2.3.6) que l'analyse de la qualité des données utilisées et le traitement des données manquantes.
  - Auteurs : Tableau intégré en annexe 1. vu par Renaud ECF et FNH
  - Panel : La référence à la qualité des données en ligne 796 et 797 n'est pas très logique. On en parle une fois la collecte de données explicites et même les calculs réalisés et présentés. Elle est bien placée en ligne 1005.
- > Attention c'est la figure des scénarios 2030 qui est placée sous le titre ACV 2016 (de même cette figure n'a pas de titre). De plus il est étrange d'avoir des commentaires sur les résultats alors qu'on présente seulement le périmètre de l'étude. A priori cette figure est également mal placée dans le texte. La définition des frontières du système doit être assez simple.

#### **Page 6 rapport M - chapitre 1.1. - 1er § -**

- Panel : L'unité fonctionnelle doit faire référence à un service rendu. Ainsi l'unité fonctionnelle serait plutôt « transporter des personnes sur une distance totale de 150 000 km sur une période de 10 ans » Le flux de référence quantifie l'unité fonctionnelle
- Réunion : OK
- Auteurs : L'unité fonctionnelle est la suivante : « transporter des personnes sur une distance totale de 150 000 km sur une période de 10 ans ». Peut-on avoir une UF distincte pour chaque gamme sachant que l'on ne compare pas les gammes entre elles? 150 000 km pour les citadines et 250 000 km pour les berlines?
  - => Explications :
    - > La fonction primaire c'est la mobilité.
    - > La fonction secondaire, est intégrée si elle est cruciale pour le système. A cela on peut répondre que le service système est un plus, ce n'est pas la fonction première aujourd'hui des véhicules.
    - > Si on voulait introduire ce service dans l'UF, il faudrait quantifier, mettre une valeur au service rendu au système électrique en kWh. Sans valeur, on ne peut intégrer cette fonction dans l'UF.
    - > On considère le service comme un bénéfice complémentaire, une optimisation de l'usage des ressources. Quand le système permet d'optimiser, c'est pourquoi en 2017, il n'y a pas de service/ de fonction secondaire. Et il y en a une en 2030.
    - > On multiplie le nombre de voitures en fonction du kilométrage : Si on distingue le kilométrage entre berlines et citadines, alors on appliquera un ratio sur le nb de véhicule pour rendre comparable l'analyse. ex. si on passe les berlines à 250 000 km on va plutôt passer sur un kilométrage à 250 000 dans l'UF, et appliquer 1,6 véhicule pour les citadines. => C'est la règle pour l'ACV selon JP.
- Panel : OK mais vérifier bien qu'on ne compare pas les gammes dans le chapitre résultats
- Auteurs : En effet, le rédactionnel ne doit pas laisser penser qu'on compare. A certains moments nous mentionner les résultats au sein de chaque gamme.
  - => Cf rapport résultats
- Panel : ok

### Page 6 rapport M - chapitre 1.2 - 6 et 7 -

- Panel : Les informations par véhicule ne sont pas homogènes. Exemple : pour certaines le poids est indiqué et pas pour d'autres. Le petit SUV semble avoir une consommation essence même en mode électricité mais pas le grand SUV (ou est-ce une information erronée pour le petit SUV- 1,8 litre/100km) donner l'ensemble des informations sous forme de tableau afin de garantir l'homogénéité des données et faciliter la lecture.
- Réunion : OK
- Auteurs : Les données seront homogénéisées pour l'ensemble des véhicules, et un tableau récapitulera l'ensemble par gamme de véhicule. OK tableau à compléter

### Page 6 rapport M - Unité fonctionnelle -

- Panel : Afin de permettre une interprétation, il est souhaitable de décrire clairement les objectifs, sur la base de ces objectifs de définir une unité fonctionnelle, ou des unités fonctionnelles mais dans ce cas elles devront être traitées dans des parties différentes du rapport. Pour chaque unité fonctionnelle décrire les scénarios de comparaison en déclinant dans le détail et en valeur absolue (pas en pourcentage) chaque paramètre définissant le scénario. Pour chaque scénario décrire les données environnementales (inventaires du cycle de vie) qui sont utilisées pour quantifier les impacts et spécifier comment ces données sont utilisées dans le calcul.
- Réunion : vu au dessus commentaire n°2.
- Auteurs : Voir commentaire n°2. OK

### Page 6 rapport M - Unité fonctionnelle/ échelle du parc

- Panel : Parmi les hypothèse appliquées, un remplacement de véhicule thermique par un véhicule électrique de 1 pour 1 est discutable, les fonctions étant différentes (par ex en autonomie), il est possible qu'un transfert soit opéré du VE vers le véhicule thermique ce qui le rendrait moins performant. Ceci peut être par exemple, une conséquence du fait de récupérer 12 TWh par an car l'utilisateur doit avoir une solution de remplacement si son véhicule n'est pas disponible car déchargé.
- Réunion : Remarque de précaution sur la limitation de l'autonomie. Ce point sera déjà précisé dans l'unité fonctionnelle. V2G : 30% seulement des véhicules, les profils d'usage et les taux appliqués doivent être précisés.
- Auteurs : Les précisions seront apportées dans le texte. Les profils de mobilité, états de charge et dé-

charge sont explicités dans la partie méthodologie de la projection 2030.

### Page 6 rapport M - 1.1 -

- Panel : L'unité fonctionnelle ne devrait pas être un kilométrage, mais la mise à disposition d'un véhicule pendant une durée donnée, sur un kilométrage donné, pour transporter des passagers et charge à définir sur des trajets à caractériser.
- Réunion : Les éléments déjà apportés lors de la réunion de mai et dans le message email vont être intégrés à l'étude.
- Auteurs : Ok pour modifier l'UF et pour distinguer les citadines et les berlines :
  - > citadines : « transporter des personnes sur une distance totale de 150 000 km sur une période de 10 ans ».
  - > berlines : « transporter des personnes sur une distance totale de 250 000 km sur une période de 10 ans ».

Explications :

- > La fonction primaire c'est la mobilité.
- > La fonction secondaire, est intégrée si elle est cruciale pour le système. A cela on peut répondre que le service système est un plus, ce n'est pas la fonction première aujourd'hui des véhicules.
- > Si on voulait introduire ce service dans l'UF, il faudrait quantifier, mettre une valeur au service rendu au système électrique en kWh. Sans valeur, on ne peut intégrer cette fonction dans l'UF.
- > On considère le service comme un bénéfice complémentaire, une optimisation de l'usage des ressources. Quand le système permet d'optimiser, c'est pourquoi en 2017, il n'y a pas de service/ de fonction secondaire. Et il y en a une en 2030. Il ne fait pas partie de l'UF.
- > On multiplie le nombre de voiture en fonction du kilométrage : Si on distingue le kilométrage entre berlines et citadines, il faut à un moment faire apparaître la comparaison entre citadine et berline. ex. si on passe les berlines à 250000 km on va plutôt passer sur un kilométrage à 250 000 dans l'UF, et appliquer 1,6 véhicule pour les citadines.

### Page 7 rapport M - chapitre 1.3 a -

- Panel : Les frontières du système (périmètre notamment) sont mélangées avec les informations relative à l'inventaire du cycle de vie, voir certains résultats (dont la source n'est pas mentionnée) Traiter les différentes étapes de l'ACV, goal, scope, Inventory and interprétation étape par étape pour couvrir l'ensemble des exigences et éviter toute mauvaise lecture du rapport.



- Réunion : Vu plus haut
- Auteurs : Ok élément revu à la lumière du format du rapport technique V2 OK
- Panel : Non. Les exclusions du système ne sont précisées que pour la phase production
- Auteurs : - Vente des véhicules : Les impacts des concessions et succursales ne sont pas comptabilisés dans l'étude. Les impacts des concessions et succursales ne sont pas comptabilisés dans l'étude. Design véhicules: remplacer par: «ingénierie et tertiaire» : les impacts des sites d'ingénierie et du tertiaire ne sont pas pris en compte car difficilement allouables au cycle de vie d'un véhicule. Fin de vie: voir chapitre 5.5 fin de vie

#### **Page 8 rapport M - chapitre 1.3 a - 2nd § -**

- Panel : Est il possible de décrire succinctement en quoi consiste la base A2mac1 pour les non sachant ? Argumenter
- Réunion : OK
- Auteurs : Cette base de données est alimentée par une société de démontage des véhicules qui met à disposition les données sur les véhicules. Il s'agit de la principale base de données utilisées en Europe par les constructeurs. OK

#### **Page 8 rapport M - 1.3.a -**

- Panel : sur la fabrication: il n'est pas clair comment le cas des moteurs thermiques et moteurs électriques sont traités. Les PHEV 'performance' ont typiquement un kW total plus important que leur équivalent ICE. Est ce pris en compte dans le Bill of Material?
- Réunion : Valeurs mesurées, liée à mesure en usage réel, et SUV 4x4. Corriger le titre et les noms des lignes table page 9. Et date 2016/2015
- Auteurs : Non ce n'est pas pris en compte. On a pris la réalité du marché, ce sont des voitures réelles.
- Les corrections seront apportées au rapport V2. Voir si il faut préciser

#### **Page 12 rapport M - chapitre 1.3 c -**

- Panel : De lors que l'on considère des crédits en fin de vie, il est nécessaire de clarifier ce qui est pris comme hypothèse pour les matériaux en entrée clarifier
- Réunion : OK
- Auteurs : Les matières qui sont recyclées sont celles qui ont une filière de recyclage. Tous les métaux sont recyclés. Alu cuivre et acier. Fonte, plastique. Les fluides sont recyclés, car extraits avant

recyclage pour la dépollution.

- > Les 15% non recyclés sont brûlés, mousse sièges textiles, tapis. et 5% de masses lourdes, type PVC, non recyclable. Ok précision apportées à la V2 - partie inventaire du cycle de vie.
- > En complément, Renault fournit les données matières qui seront adjointes au rapport. Données matières en attentes.
- Panel : OK

#### **Page 12 rapport M - chapitre 1.4 -**

- Panel : quelle est la source des données du mix 2015? Est-ce le mix français, européen ? clarifier
- Réunion : A priori sur un mix moyen, mais peut être en sensibilité un mix marginal. Soit on le présente comme tel, soit on explique pourquoi on reste sur un mix moyen. Pourrait aussi prendre la forme d'une analyse de sensibilité plus large, du pire au meilleur cas...
- Auteurs : Mix français, source Gabi. Précisé dans la partie Champs de l'étude/ mix 2015
- Panel : ok - lien avec le commentaire relatif aux différentes sources de données utilisées pour l'électricité (différence 2016 et 2030) - voir réponse des rédacteurs de l'étude plus bas dans ce fichier excel

#### **Page 13 rapport M - 1.5 - Indicateurs -**

- Panel : Pourquoi la consommation de ressources minérales n'est-elle pas prise en compte ? C'est un indicateur présenté par Renault dans l'ACV de la Fluence (en Sb eq). Il est également retenu dans l'étude ADEME sur les véhicules électriques. Le VE présente a priori un avantage sur l'effet de serre, mais peut être pénalisant sur les ressources en raison des métaux contenus dans les batteries. Ne pas prendre en compte cet indicateur est donc trompeur. Intégrer un indicateur relatif aux ressources minérales.
- Réunion : A minima, la question des ressources sera traitée de façon qualitative dans le rapport technique comme dans la synthèse de l'étude. La justification avancée en page 15 n'est pas claire, elle laisse entendre que l'indicateur Abiotic depletion est mal construit. En fait, il faut être clair sur le fait que c'est l'indicateur «Abiotic depletion fossil» seulement qui a été retenu, et que l'indicateur «Abiotic depletion mineral» n'est pas pris en compte. Et expliquer pourquoi.
- Auteurs : Les 5 indicateurs d'impact font consensus dans le monde automobile. La question des ressources minérales constitue un vrai sujet en soi, et l'ACV n'est pas le meilleur moyen d'analyser la question, car il y a des biais : cette question des res-

sources minérales mérite de prendre en compte la question de la disponibilité/ criticité, coût, analyse des risques géopolitiques, responsabilité des entreprises. Préciser partie indicateurs, dans l'inventaire de cycle de vie.

#### **Page 15 rapport M - chapitre 1.6 -**

- Panel : Une analyse ACV n'empêche pas la prise en compte d'autres indicateurs pour tirer des conclusions pertinentes sur une étude de scénario. Le caractère holistique de l'ACV n'est ici pas respecté et les limites associées de l'étude doivent être quantifiées pour que l'étude reste pertinente. revoir l'intégration d'information sur ces aspects.
- Réunion : C'est un choix méthodologique qui doit être assumé. La méthodologie de l'ACV est très flexible, de sorte qu'elle ne peut être invoquée pour justifier de limiter l'étendue de l'étude. Il est possible d'interpréter directement les flux de l'inventaire, par exemple les flux de poussières <2,5 microns ou 10 microns. Ces flux sont à la fois des données d'entrée et des données de sortie de l'étude.
- Auteurs : Sur la pollution de l'air : l'impact toxicité humaine n'est pas fiable. Il n'apporte pas de plus à cette étude au regard du scope, et de ce que l'on sait déjà par ailleurs. Éléments ajoutés sur cette partie
- Panel : OK

#### **Page 16 rapport M - chapitre 2.1 a -**

- Panel : Concernant la phrase «La projection 2030 s'effectue sur un périmètre élargi par rapport à 2016, et est organisée en plusieurs étapes successives.»
  - > Il est tout d'abord nécessaire de préciser les objectifs de l'étude- voir commentaires précédents - et d'y faire référence ici.
  - > Il est ensuite nécessaire de préciser ici quelle est l'unité fonctionnelle et le périmètre de chaque analyse. Il semble en effet que d'autres services sont pris en compte et un périmètre élargi est considéré et dès lors les UF et les périmètres changent.
  - > Enfin pour clarifier ce qui est possible en terme de comparaison, il est important de rappeler les exigences de la norme, à savoir
  - > cf. norme ISO 14044 chapitre 4.2.3.7 : »Pour une étude comparative, l'équivalence des systèmes comparés doit être évaluée avant d'interpréter les résultats. Par conséquent, le champ de l'étude doit être défini de manière à ce que les systèmes puissent être comparés. Les systèmes doivent être comparés en utilisant la même unité fonctionnelle et des considérations méthodologiques équivalentes telles que la performance, la fron-

tière du système, la qualité des données, les règles d'affectation, les modes de décisions sur l'évaluation des intrants et des extrants ainsi que l'évaluation...» a revoir

- Réunion : Cf Discussion plus haut, commentaire 8 - Clarifier l'unité fonctionnelle et le périmètre. Evolution de l'unité fonctionnelle pour 2030.
- Projection en 2030 : comme il n'y a pas de comparaison, pas nécessaire d'avoir une unité fonctionnelle commune. Il serait utile d'avoir les différents périmètres considérés sur 2030.
- Auteurs : OK
- Panel : OK

#### **Page 19 rapport M - 2.1 -**

- Panel : Consommation des V thermiques : justifier l'hypothèse de réduction de 40% d'économie
- Auteurs : Cette hypothèse a été retenue dans l'étude précédente «En route vers un transport durable» et correspond aux objectifs de la loi de transition énergétique 41/ 100. Cela sera précisé dans le rapport V2. OK vérifier l'aréf à ERTD 2015

#### **Page 22 rapport M - 2.2 -**

- Panel : Quid d'une dégradation possible de l'empreinte environnementale de l'énergie suite à une raréfaction des ressources ?
- Auteurs : préciser ce que couvre la raréfaction des ressources à horizon 2030 et les hypothèses possibles à souligner.

#### **Page 28 rapport M - 2.2.c -**

- Panel : 2 problèmes: 1) valeur dans la table est non cohérente avec les valeurs montrées an 1.3b (berline full EV) 2) la table 1.3b labelle les valeurs comme NEDC mais cette table labelle les valeurs comme 'conditions réelles'
- Réunion : Corriger le titre et les noms des lignes table page 9
- Auteurs : OK les corrections seront apportées. Vérifier les conso

#### **Page 37 rapport M - 2.4.b -**

- Panel : pourquoi la charge normale est elle fixée à 6kW? Il faudrait que ce choix soit justifié dans le rapport. Pour référence: dans le rapport ECF 2015 (en route pour un transport durable), 3kW a la maison et 7kW pour le lieu de travail.
- Réunion : A justifier - Smart box de Renault plutôt du 7.
- Auteurs : La charge normale sera fixé à 7 et non à 6. OK

#### Page 40 rapport M - 2.4.d -

- Panel : voir commentaire fait lors de la réunion 11/05/2017 «il est proposé de mesurer la capacité de l'usage en seconde vie à faire évoluer le mix électrique, à partir de la part des renouvelables, plutôt que de mesurer des émissions évitées, qui restent relatives au mix et peuvent induire en erreur. »
- Réunion : Les mix électriques de 2030 sont des illustrations, une variable. RTE : c'est peut être une question de référence : il faut trouver la bonne façon de présenter la seconde vie. Montrer que nous ne sommes pas sur le même niveau d'analyse. Mieux scinder la présentation.
  - > Jérôme : c'est un élément important, poser clairement les termes, scinder les deux niveaux, présenter la charnière en affichant les performances; et par ailleurs en identifiant les limites, en les citant. Cf. ACV conséquentielle, on décide d'interroger la dispo des batteries neuves etc. Est ce que les infrastructures : toute une liste de limite.
  - > HT : effectivement
  - > Il faut montrer l'empreinte du kWh.
  - > L'empreinte kWh
  - > Jérôme participe à l'identification du scope de limites.
- Auteurs : Les limites seront précisées par J. Payet. Parmi les limites qu'enous mentionnerons : les systèmes de gestion des batteries qui sont source d'impacts environnementaux; et le nombre de batteries disponibles en 2030 sur le marché seconde vie. Concernant l'impact de la consommation des EV sur le réseau électrique : Les analyses / arguments que nous pouvons mettre en avant sont les suivants :
  - > La tendance baissière de la consommation (en particulier dans le bâtiment) = ajout d'éléments externes ; Voir le bilan prévisionnel RTE 2017 provisoire.
  - > Le chiffres de consommation globale à l'échelle du parc auto considéré (4,4 millions, et sensibilité à 5, 6) par rapport à la consommation globale ; Cf. également le bilan prévisionnel 2016 ou 2015 sur ce point.
  - > Le rôle de la charge intelligente ; on a fait un calcul avec 0 et 100%, faire un calcul intermédiaire (25 et 50?). Mentionner l'analyse ECF Artelys Element Energy. Attente du retour de J. Payet

#### Page 49 rapport M - 6.4.c) -

- Panel : Les véhicules thermiques en 2030 possède une hybridation légère Est ce que cette hybridation légère a un impact non négligeable sur la masse du véhicule ? Aucune variation de masse du véhicule n'a été prise pour la prospection ?

- Réunion : Il est indiqué page 46 : La masse totale des différents véhicules n'évolue donc pas entre 2016 et 2030. Les experts proposent de considérer que l'allègement potentiel des véhicules peut être compensé par l'évolution des équipements embarqués. Ce choix s'explique par la nécessité de refaire une ACV si on introduisait une variation de matériaux/ masse
- Auteurs : Il est indiqué page 46 : La masse totale des différents véhicules n'évolue donc pas entre 2016 et 2030. Les experts proposent de considérer que l'allègement potentiel des véhicules peut être compensé par l'évolution des équipements embarqués. Ce choix s'explique par la nécessité de refaire une ACV si on introduisait une variation de matériaux/ masse
- Panel : ok

#### Page 63 rapport M - 6.6 c) -

- Panel : «Les facteurs d'impacts par filière (pour les cinq indicateurs environnementaux) quantifient l'impact environnemental de la production d'1 kWh pour une filière donnée. Ils sont issus de la base de données EcoInvent version 3.2, publiée en 2015» EcoInvent ne donne pas des facteurs d'impacts mais des données et des flux. Les méthodes de caractérisation qui contiennent les facteurs d'impact sont CML, ReciPE, IPCC... D'ailleurs où sont précisées les méthodes qui sont utilisées pour les résultats d'impact ?
- Auteurs : corrigé et réf à CML
- Panel : ok

#### Rapport R - général -

- Panel : A partir de quel seuil les écarts entre résultats comparés sont-ils considérés comme significatifs ? Plus généralement, quelle est la précision de l'étude ? Rappeler dans le rapport la nature «approchée» des résultats, et en tirer des conclusions pour la présentation et le commentaire des résultats.
- Réunion : Sera pris en compte dans le rapport
- Auteurs : L'incertitude ou plutôt l'écart significatif est environ 5%.

#### Page rapport R - présentation -

- Panel : Chaque hypothèse repose sur un certain nombre de paramètres. Il serait intéressant de spécifier le sens dans lequel va affecter le système, et les interdépendances entre les différents paramètres.
  - > Le nombre de paramètres étant très important il faut pouvoir hiérarchiser les paramètres ma-

jeurs et décrire leur tendance en terme de conséquences sur les résultats. Il faudrait également faire une distinction explicite entre les paramètres qui varient entre les scénarios et ceux qui varient au sein de chacun des scénarios.

- Réunion : Avant chaque graphe, exposer les paramètres qui varient
- Auteurs : Cf. remarque n°1. Préciser les paramètres majeurs et noter l'interaction éventuelle entre les facteurs (influence, contradictions). La présentation des scénarios sera améliorée afin de mettre en lumière ce qui varie.
  - > Exemple de question : le bénéfice recyclage est-il compatible avec la seconde vie ? Entre taille de la batterie et service rendu ?
  - > Via un tableau d'influence des variables?
  - > Question aux experts : est ce un schéma qui est recommandé? Ou une analyse simple?
- Panel : L'un ou l'autre est OK.

#### **Page 2 rapport R - présentation -**

- Panel : Les hypothèses relevant d'une exigence réglementaire ou stratégique doivent être clairement distinguées de celles relevant de choix faits pour l'étude (e.g. cadre p2)
- Réunion : OK

#### **Page 3 rapport R - chapitre 1.1 Resultats par indicateurs - ligne 9 -**

- Panel : Le parc considéré prend en compte uniquement un parc de voitures électriques en 2030. Il vient d'être annoncé que la vente de véhicules thermiques serait interdite en 2040 donc il est clair qu'il y aura encore des véhicules thermiques à l'achat en plus des véhicules encore en utilisation. Il est donc important de préciser que le parc de véhicules de 4,4 millions de véhicules ne correspond pas au parc qui circulera en France en 2030 mais d'une estimation de la partie du parc de véhicules qui pourra rendre les services supplémentaires de véhicules-to-grid à cet horizon.
  - > Quelles sont les hypothèses concernant le nombre de véhicules thermiques à horizon 2030?
  - > De plus les résultats sont ensuite donnés pour des véhicules thermiques en 2030 et les résultats sont également donnés à l'échelle d'un parc de véhicules. Il est donc primordial de clarifier de quel parc parle-t-on? et de quel périmètre parle-t-on en 2030 lors que l'on parle des véhicules ( en plus de l'unité fonctionnelle considérée - voir commentaire précédent). clarifier à quoi correspond l'hypothèse de 4,4 millions de véhicules.
- Réunion : Sera clarifié. De plus, l'opportunité de

considérer une référence de 4,4 millions de véhicules thermiques comme référence sera envisagée. Cela est pertinent dans la perspective d'une ACV conséquente. Le choix devrait être clair une fois posés l'unité fonctionnelle de l'étude prospective et les frontières du système associées - cf discussion sur le rapport méthodologique

- Auteurs : Le parc considéré est uniquement électrique, le parc thermique n'a pas été considéré. La présentation du parc électrique sera détaillée dans le rapport technique V2.
- Panel : OK

#### **Page 3 rapport R - chapitre 1.1 Resultats par indicateurs - 3 - ligne 15 et 4 - ligne 18 -**

- Panel : «La capacité du recyclage à réduire l'empreinte environnementale du véhicule est importante. Dans l'analyse, les crédits de recyclage représentent entre 27% de l'impact d'une berline électrique en 2016, et jusqu'à 46% en 2030. Pour les citadines, les crédits de recyclage en 2016 représentent plus de 20% de l'impact global du véhicule et 32% de l'impact en 2030.»
  - > Expliquer d'où vient cette augmentation du recyclage? On peut s'attendre à ce que les voitures soient de plus en plus produites à partir de matériaux issus du recyclage. Est-ce que la limite de recyclabilité spécifique à chaque matériaux est prise en compte? Clarifier ces éléments et bien mettre en évidence l'ensemble des hypothèses prospectives
- Auteurs : Répondu dans la partie méthodo.
- Panel : OK

#### **Page 4 rapport R - 2nde vie -**

- Panel : Pourquoi la seconde vie apparaît-elle ici ? D'après l'introduction en page 1, on s'attend à ce que cela soit inclus dans la seconde partie.
- Réunion : Sera déplacé en partie 2.
- Auteurs : La seconde vie apparaîtra en effet dans la partie sensibilité. Elle est appréciée par rapport à sa fonction, qui est le stockage. En comparaison aux STEP.

#### **Page 5 rapport R - chapitre 1.1 Resultats par indicateurs - ligne 7 -**

- Panel : clarifier en quoi consiste cette seconde vie. N'y-a-t'il pas d'installation nécessaire pour pouvoir mettre en place cette seconde vie? Ou sont pris en compte ces éléments? Le périmètre n'est pas suffisamment clair clarifier le périmètre

- Réunion : Vu dans la discussion sur le rapport méthodologique
- Auteurs : voir rapport méthodo et réponse précédente.
- Panel : OK

#### **Page 13 rapport R - chapitre 1.5 Resultats par indicateurs - ligne 25 -**

- Panel : «Cet impact connaît une baisse sensible à horizon 2030.» Il est important de préciser l'hypothèse à l'origine de cette baisse (40% de conso en moins) et de faire référence à un chapitre qui parle de la robustesse de ces hypothèses ou des études de sensibilité évaluant l'influence de telles hypothèses. Expliciter les contributeurs des impacts observés
- Réunion : cf ci-dessus
- Auteurs : les précisions seront apportées.
- Panel : Non pris en compte. Il n'y a pas d'analyse de sensibilité sur le sujet et la robustesse des hypothèses n'est pas développée. Cela n'a pas pu être réalisé, par manque de moyens.

#### **Page 16 rapport R - 2.2 -**

- Panel : Pourquoi seulement l'empreinte climat ? Quid des autres indicateurs ?
- Réunion : La raison avancée par les auteurs de l'étude est que c'est l'intérêt qui motive le basculement vers la mobilité électrique. Dans une logique «cycle de vie / multicritère», il est important de vérifier qu'il n'y a pas de «transfert de pollution» avec la dégradation d'un autre impact. Les éléments calculés dans l'étude ACV du VE devraient permettre d'étayer cette discussion.
- Auteurs : Un graphique permettra de montrer les résultats sur l'ensemble des indicateurs afin de montrer que sur certains indicateurs cela n'a pas d'influence majeure et explicitera le choix des indicateurs.

#### **Page 18 rapport R - chapitre 2.2 -**

- Panel : Selon une approche ACV, le périmètre et l'unité fonctionnelle change au cours de l'étude. Il y a donc plusieurs périmètres, plusieurs unités fonctionnelles qui doivent être bien clarifiées au début de l'étude dans le rapport techniques. Sur la partie seconde vie, clarifier ce qui est pris en compte en terme d'infrastructure bien clarifier les différentes unités fonctionnelles et périmètres pour chaque étape de cette étude
- Réunion : Vu dans la discussion sur le rapport méthodologique
- Auteurs : vu dans le rapport méthodo.

- Panel : OK

#### **Page 20 rapport R - chapitre 2.2 -**

- Panel : Les véhicules sont comparés pour des unités fonctionnelles différentes puisque le véhicule de 2030 rend un service supplémentaire. Il est très important de clarifier ce point.
- Réunion : Vu dans la discussion sur le rapport méthodologique
- Auteurs : OK
- Panel : OK

#### **Page 27 rapport R - Analyses de sensibilité -**

- Panel : Ces remarques concernent toutes les analyses de sensibilité :
  - > Il serait utile de rappeler les variables dont la variation a été testée, et la plage de variation.
  - > Rappeler l'unité fonctionnelle dans les tableaux de présentation des variations d'indicateurs. (p 27, 31, 32)
  - > Les graphes ne sont pas suffisamment explicites. La contribution par véhicule est une information peu utile, qui n'est d'ailleurs jamais commentée. En revanche, il manque un titre explicite aux graphes, et il serait plus parlant d'afficher les variations sur un même graphe.
  - > Commenter les résultats des analyses de sensibilité
  - > Rappeler les variables, leur zone de variation et l'unité fonctionnelle.
  - > Proposer des graphes plus parlants, en supprimant l'information non nécessaire.
- Réunion : OK
- Auteurs : les analyses de sensibilité vont être reprises : présentation des hypothèses, clarté des graphiques, analyses. Avec un rappel en tête de chapitre sur les paramètres généraux.

#### **Page 33 rapport R -**

- Panel : Conclusion : il manque une conclusion à l'étude. Ajouter une conclusion
- Réunion : OK
- Auteurs : Une conclusion sera ajoutée in fine. Y a-t-il des recommandations concernant cette conclusion ?

# BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, « Etude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables », 2011.
- ADEME, « Elaboration selon le principe des ACV des bilans énergétiques des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à horizon 2012 et 2020 », 2013.
- ADEME, "Environmental communication on mass market products", 2011.
- ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations - un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050 », juin 2016.
- ABattRelife, automotive battery recycling and second life », Synthèse du projet, 2015.
- Batteries 2020, « Testing and ageing protocols for second life batteries. Understanding degradation », 2016.
- Batteries 2020, « Ageing effects of Lithium-ion batteries », Institute for power electronics and electrical drives, Rwthachen University, 2015.
- BAEUR C et al. « The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework » Appl Energy, 2015.
- Cambridge Econometrics, for European Climate Foundation, SUMMERTON P, BILLINGTON S, HARRISON P. and GILBERT-D'HALLUIN A., « En route pour un transport durable », 2015.
- CANALS CASALS L., Sunbatt: Use of a Second Life Battery System from PHEV in Stationary Applications », Conference Paper, 2015.
- Cambridge Econometrics, HILL, N, KOLLAMTHODI S, VARMA A., CESBRON S, WELLS P., SLATER S., CLUZEL C., SUMMERTON P., POLLITT H. BILLINGTON S., WARD T., and HARRISON P., Ricardo AEA, Cardiff University, Element Energy, Applica for European Climate Foundation, Fuelling Europe's Future, 2013.
- CGDD, « Les véhicules électriques en perspective. Analyse coûts-avantages et demande potentielle », 2011.
- Element Energy and Artelys for European Climate Foundation, BESSELING J, CLUZEL C., STEWART A., BIDET P, CHAMMAS M., « EV Grid Synergy Analysis France », 2015.
- CREARA «Electric vehicle battery Ageing in real-driving conditions: a review», 2016, Spain.
- ENEDIS, « Retour d'expérience sur l'utilisation de stockage dans les démonstrateurs Smart Grids d'Enedis », 2016.
- HYUNG CHUL K., WALLINGTON J., ARSENAULT R., CHULHEUNG B., SUCKWON A., LEE J., « Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis », Environ. Sci. Technol., 2016.
- ICCT, BRIEFING of November 2016, "2020-2030 CO2 Standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union", 2016.
- IEA, "The World Energy Outlook", 2016, Paris.
- INSEE - Ministère des Transports, « Enquête nationale transports et déplacements », 2008.
- Joint Research Center, "Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context", 2014.
- MAEDI, « Le lithium des voitures électriques n'est pas une ressource renouvelable », Bulletin électronique, 2011.
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, « Stratégie nationale de mobilité propre », 2016.
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, « Cadre national de développement des carburants alternatifs », 2016.
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, « Programmation pluriannuelle de l'énergie », 2016.
- NegaWatt, « Le véhicule électrique permet-il de réduire les émissions de CO2 ? », 2016.
- OBADIA A, membre du CESE, « Le stockage de l'énergie électrique : une dimension incontournable de la transition énergétique », Avis, 2015.
- OLIVEIRA L-M, « Environmental Life Cycle Assessment - First Life and Second Life Analysis », project Batteries 2020, May 2016, Vrije Universitat Brussel, MOBI.
- PERDY F., « Batteries: energy and matter issues for renewables and electric mobility », CEA, 2016.
- PERDY F, « Overview of existing and innovative batteries of the storage on the renewable electricity life cycle, Science for energy scenarios », CEA, 2016.
- PILLLOT C., Avicenne Energy, « The rechargeable battery market and main trends 2015-2025 », 2016.
- RTE, « Bilan prévisionnel de l'équilibre Offre demande de la demande d'électricité », 2014.
- RTE, "Réseaux électriques intelligents - Valeur économique, environnementale et déploiement d'ensemble », Juin 2017.
- SHINZAKI, S., SADANO, H., MARUYAMA Y., and KEMPTON W., « Deployment of Vehicle-to-Grid Technology and Related Issues », SAE Technical Paper 2015-01-0306, 2015, - Honda R&D Co & University of Delaware.
- STRICKLAND D., L. CHITTOCK S., FOSTER, BRICE B. « Estimation of Transportation Battery Second Life for use in Electricity Grid Systems », IEEE Transactions on Sustainable Energy Volume: 5, July 2014 .
- TARASCON J.M, « Stockage de l'énergie via les batteries : quelle chimie, quel futur ? », 2015.
- WANG D., COIGNARD J., ZENG T., ZHANG C., SAXENA S., « Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services », Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016.
- WOLFRAM P., LUTSEY N., « Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions », 2016.
- Database: Handbook Emission Factors for Road Transport, 2016.

---

### ***Rapport technique – décembre 2017***

Cette étude a été réalisée entre mai 2016 et novembre 2017

---

### ***Coordination et rédaction***

- Marie Chéron, Fondation pour la Nature et l'Homme (FNH)
- Abrial Gilbert-d'Halluin, European Climate Foundation (ECF)

---

### ***Réalisation technique***

- Aurélien Schuller, Carbone 4

---

***La FNH et ECF tiennent à remercier les membres du comité de pilotage*** pour leurs contributions et leur implication tout au long de ce travail collectif. Les parties prenantes qui ont contribué à cette étude ont partagé l'ambition d'établir, dans la transparence, un échange constructif sur les enjeux techniques et environnementaux liés au développement de l'électromobilité pour les particuliers. Chacune des parties prenantes a apporté sa connaissance des enjeux et sa vision. Les informations et les conclusions contenues dans ce rapport représentent la vision du groupe de travail et non nécessairement celle des sociétés et organisations prises individuellement.

- Yasmine Assef, Groupe Renault
- Esther Bailleul, CLER
- Joseph Beretta, AVERE
- Adrien Bouteille, ex groupe Renault
- Marie Castelli, AVERE France
- Emanuele Colombo, RTE
- Jean-Baptiste Crohas, WWF France
- Jean-François Delaire, WWF France
- Béatrice Lacout, SAFT
- Lorelei Limousin, Réseau Action Climat
- François Marie, Groupe Renault
- Hervé Mignon, RTE
- Maxime Pasquier, ADEME
- Clémence Siret, SAFT

---

***La FNH et ECF remercient également les experts de la revue critique*** qui ont apporté un éclairage particulièrement utile et ont permis de conforter cette étude dans sa méthode et ses résultats.

- Hélène Teulon, Gingko 21
- Philippe Osset, assisté de Delphine Bauchot et Cécile Beaudard, Solinnen
- Céline Cluzel, Element Energy
- Jérôme Payet, EPF Lausanne, Cycleo

L'analyse de cycle de vie a été réalisée selon les exigences des normes ISO 14040 et 14044 (revue Critique en annexe).

---

***Pour citer ce rapport*** : « Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ? », Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation, décembre 2017.

***Cette étude est soutenue par European Climate Foundation.***

# DÉMONSTRATEUR DE SOLUTIONS

Créée en 1990 par Nicolas Hulot, la FNH est aujourd'hui présidée par Audrey Pulvar. Elle s'est donné pour mission de proposer et d'accélérer les changements de comportements individuels et collectifs, en faisant émerger et en valorisant, des solutions en faveur de la transition écologique de nos sociétés. Pour y parvenir, la Fondation mène en toute indépendance un travail de prospective et de plaidoyer, elle fait émerger et accompagne les acteurs du changement et mobilise le grand public.

Afin de mener à bien sa mission, la Fondation combine la réflexion, l'action et la sensibilisation.

Elle élabore des idées nouvelles et porte des propositions auprès des décideurs politiques et économiques, avec son Conseil scientifique et son réseau d'experts pluridisciplinaires de haut niveau.

Elle fait émerger et accompagne les acteurs du changement en soutenant et valorisant, en France comme à l'international, des initiatives porteuses d'avenir afin de les démultiplier à plus grande échelle. Cette réalité du terrain inspire et nourrit la production intellectuelle.

Et pour que chacun puisse être moteur de la transition écologique, elle élabore des outils et des campagnes de mobilisation citoyenne.

La Fondation est également une ONG environnementale représentative. A ce titre, elle siège dans plusieurs organismes consultatifs tels que le Conseil économique social et environnemental ou le Comité national de la transition écologique.

---

*La Fondation pour la Nature et l'Homme remercie TF1 en tant que Partenaire Fondateur, l'Ademe, Renault et Rte de leur soutien à la réalisation de cette étude*

