

Le véhicule électrique dans la transition écologique en France



Coordination et rédaction

Marie Chéron,
Fondation pour la Nature et l'Homme
Abrial Gilbert-d'Halluin,
European Climate Foundation

Réalisation technique

Aurélien Schuller,
Carbone 4

Membre du groupe d'experts

Esther Bailleul, CLER
Joseph Beretta, Marie Castelli,
AVERE France
Adrien Bouteille,
ex-groupe Renault
Jean-Baptiste Crohas,
WWF
Béatrice Lacout,
Clémence Siret, SAFT
Lorelei Limousin,
Réseau Action Climat
François Marie,
Groupe Renault
Hervé Mignon, Emanuele Colombo
RTE
Maxime Pasquier,
ADEME

Experts de la revue critique

Philippe Osset assisté de Cécile
Beaudard et Dephine Bauchot
Solinnen
Céline Cluzel,
Element Energy
Jérôme Payet,
EPF Lausanne, Cycleo
Hélène Teulon,
Gingko 21



GROUPE RENAULT



Les informations et conclusions contenues dans ce rapport de synthèse présentent la vision du groupe de travail et non nécessairement celle des organisations et entreprises prises individuellement.



Sommaire

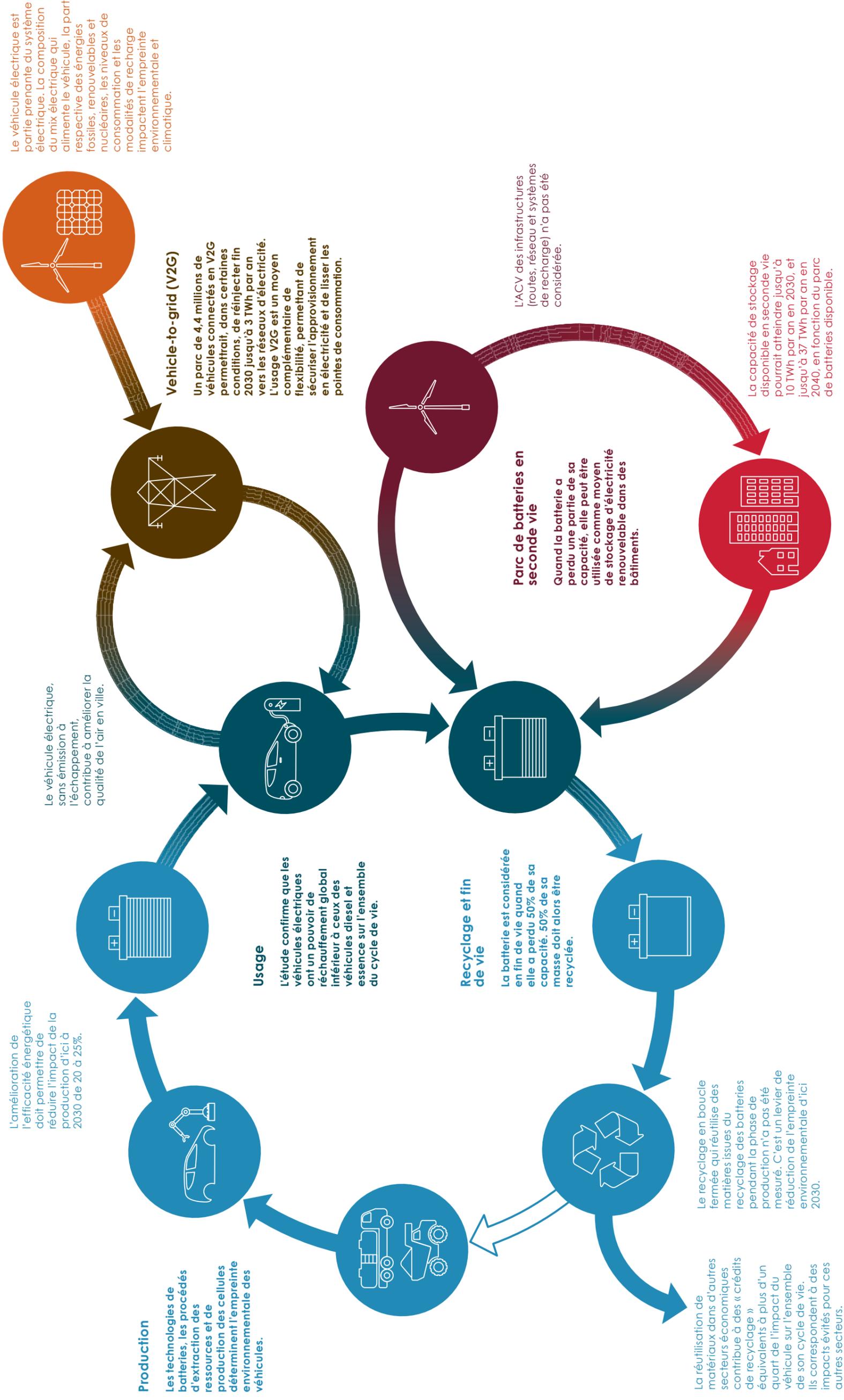
Le cycle de vie des véhicules électriques	2
Trois scénarios contrastés de déploiement du véhicule électrique en France d'ici 2030	4
Résumé	6
Climat et énergie : les atouts de l'électromobilité dans la transition énergétique	8
Les enjeux de l'économie circulaire pour la filière du véhicule électrique	11
Le véhicule-to-grid, moyen complémentaire de flexibilité pour le système électrique	14
Les batteries de seconde vie, moyen de stockage des énergies renouvelables	18
Références bibliographiques et rappel des indicateurs d'impact	19

Liste des figures

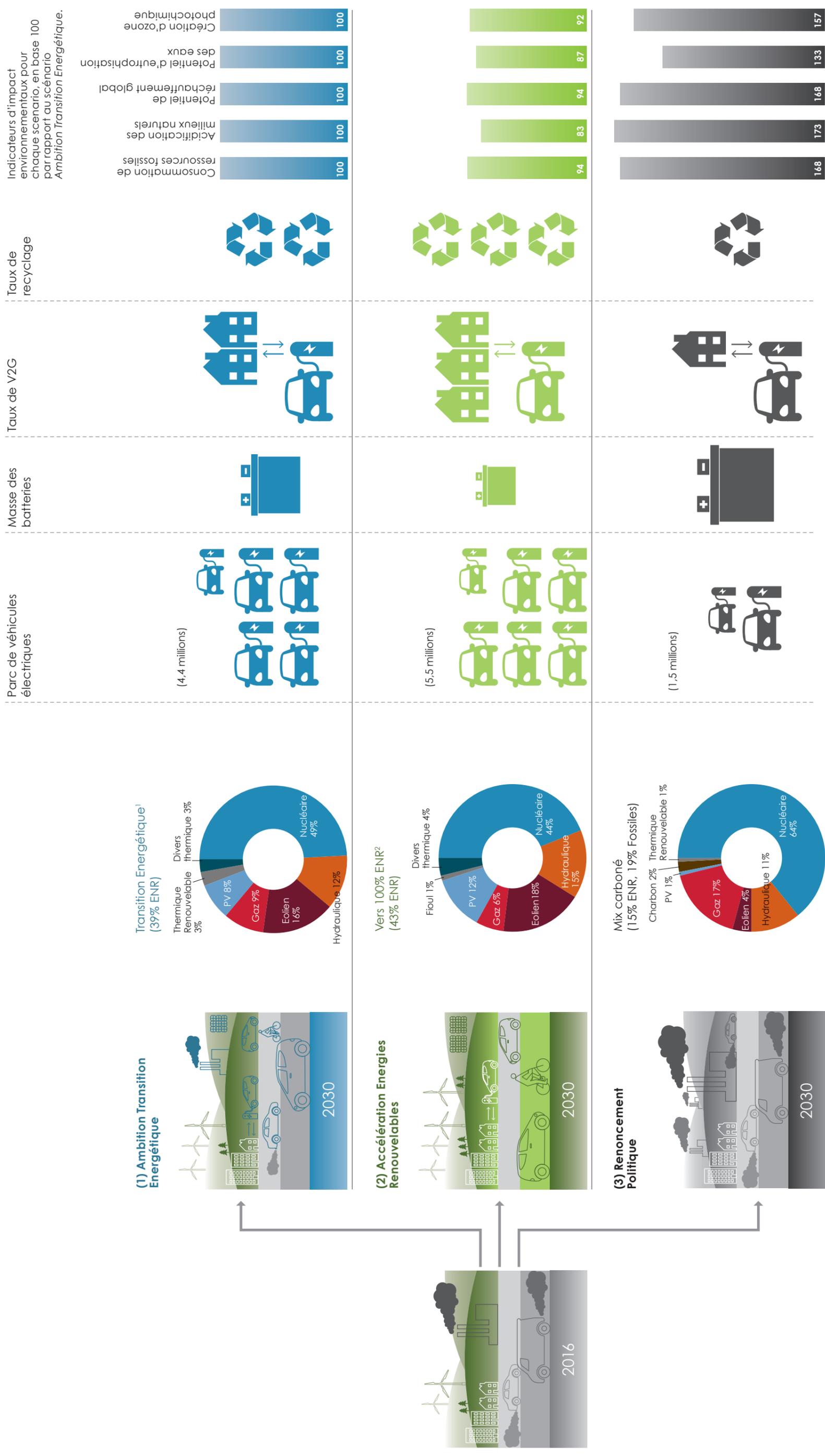
Figure 1 Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines	8
Figure 2 Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines	9
Figure 3 Echanges bidirectionnel d'électricité (V2G) d'une citadine électrique pendant une journée d'hiver	15
Figure 4 Potentiel des services rendus au système électrique dans les différents scénarios	16
Figure 5 Capacité de stockage et de réinjection en seconde vie comparée entre les scénarios	18

Le cycle de vie des véhicules électriques

Usage de mobilité et services rendus au système électrique



Trois scénarios contrastés de déploiement du véhicule électrique en France d'ici 2030



¹ Cette étude a été menée sur la base des données long terme du Bilan Prévisionnel 2014 de RTE, et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie 2016, 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.

² Source : Ademe : Vers un mix 100% renouvelable en 2050

Le Plan climat lancé par le gouvernement français en juillet 2017 fixe à 2040 la fin de la vente des véhicules essence et diesel. Ce cap s'inscrit dans une dynamique européenne de lutte contre le changement climatique et répond à la volonté de sortir de la dépendance au pétrole. Dès lors, il s'agit d'accélérer la transformation des pratiques de mobilité, en maîtrisant la demande, en favorisant la diversification des modes de déplacement ainsi que les nouveaux usages, et en accélérant la conversion du parc vers les carburants alternatifs. Le déploiement des véhicules électriques apparaît dans ce contexte comme une des priorités.

Les atouts des véhicules électriques pour réduire la pollution locale de l'air, en particulier dans les villes, sont aujourd'hui largement connus. En revanche, leur contribution et les limites de celle-ci à la lutte contre le changement climatique, à la transition écologique, et à l'atteinte des objectifs de la loi française de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 méritent d'être clarifiées. Il en va de même vis-à-vis de la réduction des nuisances sur l'environnement et des pressions sur les ressources naturelles. **Dans cette perspective, nous proposons ici une analyse des impacts environnementaux et climatiques des véhicules électriques, hybrides rechargeables et thermiques sur l'ensemble de leur cycle de vie.** L'étude a permis d'explorer les risques et les opportunités du déploiement de « l'électromobilité » en France, à l'horizon 2030, dans le cadre de la transition écologique et énergétique.

D'ici 2030, la situation énergétique de la France est amenée à évoluer fortement : arrêt des centrales thermiques au charbon ou au fuel, réduction du parc nucléaire, développement plus rapide des énergies renouvelables, baisse de la consommation d'énergie à tous les niveaux ou encore décentralisation de la production d'énergie. Il y a une complémentarité entre les évolutions qui s'amorcent dans le secteur des transports dès aujourd'hui et celle que la France connaîtra d'ici à 2030 et a fortiori à 2050.

Trois scénarios de développement de l'électromobilité à l'horizon 2030 ont été construits :

- 1) *L'Ambition Transition Énergétique*
- 2) *L'Accélération en faveur des Énergies Renouvelables, créatrice d'opportunités*
- 3) *Le Renoncement Politique et les risques environnementaux associés*

Chacune de ces visions met en lumière les risques et les opportunités environnementales liées aux évolutions des batteries des véhicules électriques et

de leurs modes de production, aux pratiques de recyclage, ainsi qu'au mix électrique et à sa composition. L'analyse est multicritère, elle mesure, tout au long du cycle de vie des véhicules, les impacts sur le climat (potentiel de réchauffement global, exprimé en t CO₂-eq.), la consommation de ressources fossiles (en MJ), l'acidification des milieux naturels (en SO₂-eq.), l'eutrophisation des eaux (en kg PO₄-eq.) ainsi que la création d'ozone photochimique (en kg Ethene eq.).

Chaque scénario évalue également les opportunités ouvertes par les fonctions de stockage d'électricité qu'offrent les batteries. En effet, quand le véhicule électrique est stationné et en charge, il est en mesure d'exporter une partie de l'électricité contenue dans la batterie vers le réseau, en usage dit « *vehicle-to-grid* ». Ces échanges, à l'échelle d'un véhicule mais surtout d'un parc, pourraient permettre de soulager les pics de consommation d'électricité, en journée ou la nuit. Ils pourraient aussi aider à maîtriser les surcharges, les niveaux de tension et la fréquence électrique, en absorbant les surplus d'électricité produite de manière variable par les énergies renouvelables, par exemple à partir de panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes. Une fois qu'une batterie a servi dans un véhicule électrique et a perdu une grande partie de sa capacité initiale (par exemple 20%), et donc de son autonomie, elle peut entrer en seconde vie. Une fois reconditionnée, elle peut servir de moyen de stockage pour les énergies renouvelables. Ces usages complémentaires des batteries, et plus globalement les synergies entre le système électrique et le secteur de la mobilité en France, ouvrent de nouvelles opportunités pour accélérer la transition écologique. L'horizon de l'analyse, défini à 2030, constitue un point de passage pour atteindre les objectifs de la transition énergétique en 2050.

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 CO₂, déchets radioactifs). Les atouts environnementaux des véhicules électriques pour lutter contre le changement climatique se confirment en 2016 et en 2030 dans le cas où les objectifs de la loi de transition énergétique sont atteints, scénario 1, et se renforcent dans un scénario ambitieux de développement des renouvelables, scénario 2.



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, masse, usage – et du renforcement des pratiques de recyclage.

Par ailleurs, les atouts environnementaux des véhicules électriques pourraient être accentués, selon l'analyse proposée ici, en maximisant l'usage des batteries pour la mobilité (partage de véhicules et augmentation du kilométrage) et 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 rendus au système électrique dans le cas de chacun des 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 notamment.

Cet usage est un moyen d'optimiser les ressources naturelles, et un outil pour accélérer la transition énergétique au-delà de 2030. En effet, le stock de véhicules en 2030 est considéré comme un point de passage vers 2050. Le niveau d'ambition du déploiement de l'électromobilité en France définira le potentiel de stockage disponible en 2040 et au-delà. Les 3 scénarios illustrent des chemins contrastés de ce point de vue.

Associé 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 pourrait accompagner la transition énergétique, le développement des renouvelables et une sortie progressive des énergies fossiles et nucléaire. 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.

Pour réaliser cette étude, la Fondation pour la Nature et l'Homme et la European Climate Foundation ont rassemblé des ONG, ainsi que des acteurs institutionnels et privés. Le secteur de l'automobile a été représenté par Renault, l'écosystème électromobilité par l'Avere-France, et 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 également participé : le Réseau Action Climat France, le WWF France, le Réseau pour la transition énergétique (CLER), la Fondation pour la Nature et l'Homme et enfin, la Fondation Européenne pour le Climat. La prospective 2030 a été réalisée par Carbone 4. Afin de valider la robustesse de la méthodologie abordée, la plausibilité des résultats et la transparence de l'analyse, quatre experts indépendants ont effectué une revue critique de l'étude.³

3 Le rapport de revue critique est mis en annexe du rapport technique.

Climat et énergie : les atouts de l'électromobilité dans la transition énergétique

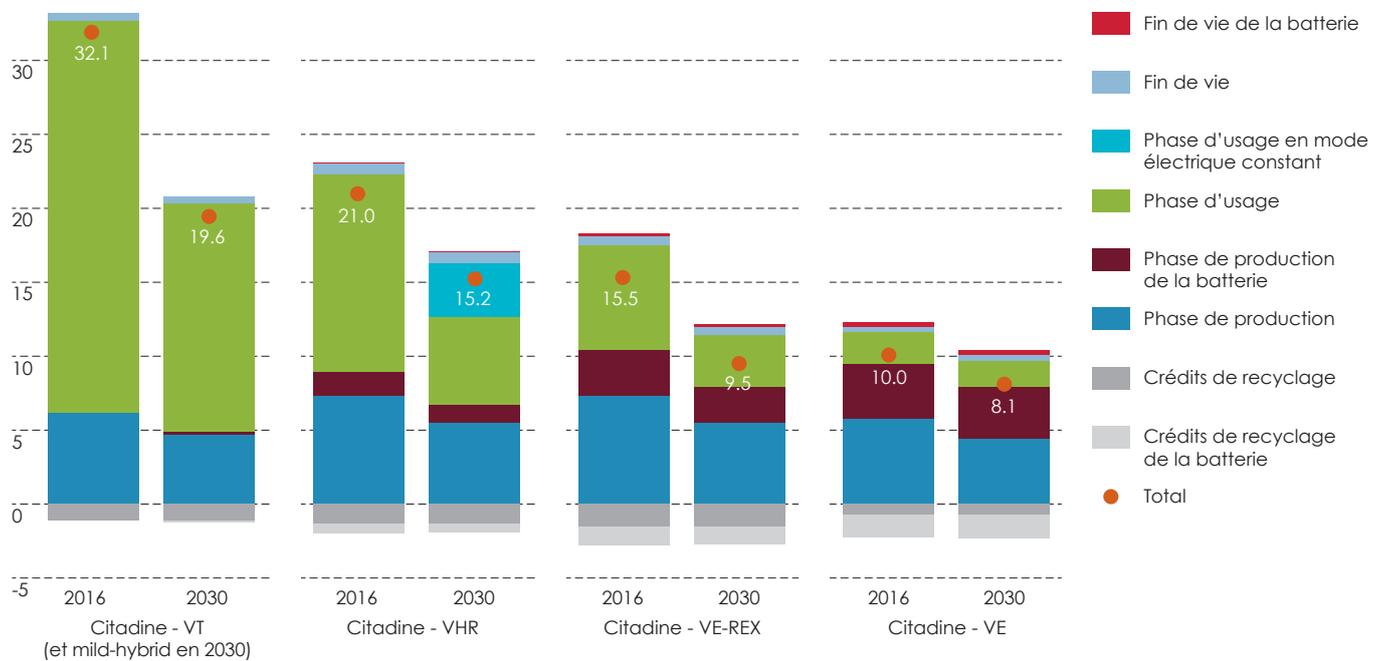


Figure 1
Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des citadines (t CO₂-eq.)

Les atouts environnementaux du véhicule électrique sont intrinsèquement liés à la mise en œuvre de la transition énergétique et écologique. En prenant en compte les différentes étapes du cycle de vie, « du berceau à la tombe », aujourd'hui, les citadines et les berlines électriques chargées en France, ont une contribution au changement climatique 2 à 3 fois inférieure à celle des véhicules thermiques. Cet atout se maintient en 2030 dans le cas où les objectifs de la loi de transition énergétique sont atteints, et se renforce dans le cas où la France rehausse ses objectifs de développement des énergies renouvelables et s'engage dans un scénario 100% ENR.

Le transport est un secteur clé de la transition écologique. C'est également le seul secteur dont les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté en France depuis 1990. Il représente environ 30% des émissions de gaz à effet de serre de l'Hexagone. Il dépend à 94% des carburants fossiles. Il est donc primordial d'accélérer la transition dans les transports par la voie de la sobriété, le report modal, de l'efficacité énergétique et de l'électrification à partir des énergies renouvelables.

L'impact sur le climat d'un véhicule électrique se situe principalement lors de la phase de production (75%).

Les émissions des gaz à effet de serre associées sont dues d'une part à la fabrication du véhicule (carrosserie, production d'acier, de plastiques) et d'autre part à celle de la batterie. Pour cette dernière, les émissions sont associées à l'énergie consommée pour extraire, épurer et transformer les ressources minérales qui servent à la production des cellules de la batterie (ensemble d'anodes et de cathodes).

L'autre déterminant de l'impact environnemental du véhicule électrique concerne les modalités de production de l'électricité utilisée pour rouler, et donc les externalités associées (émissions de polluants, de gaz à effet de serre, déchets radioactifs). Si l'électricité qui alimente la batterie a été produite dans des centrales fonctionnant aux énergies fossiles et/ou fissiles, l'impact environnemental du véhicule sera plus élevé. A l'inverse, un mix électrique reposant largement sur les énergies renouvelables permet de réduire l'impact environnemental de la voiture électrique.

L'empreinte carbone des véhicules électriques varie notamment en fonction du contenu carbone de l'électricité consommée, et donc de la composition du mix. Le contenu carbone est défini par un facteur d'émission qui peut varier de quelques dizaines de g CO₂/km pour l'électricité d'origine renouvelable (78g CO₂/km pour le solaire, 22 g CO₂/km pour l'éolien) à 430 g CO₂/km pour le gaz ou plus de 1kg de CO₂ pour le charbon. Les paramètres qui influent sur la composition du mix électrique à un instant donné sont donc à prendre en compte. Ceux-ci incluent par

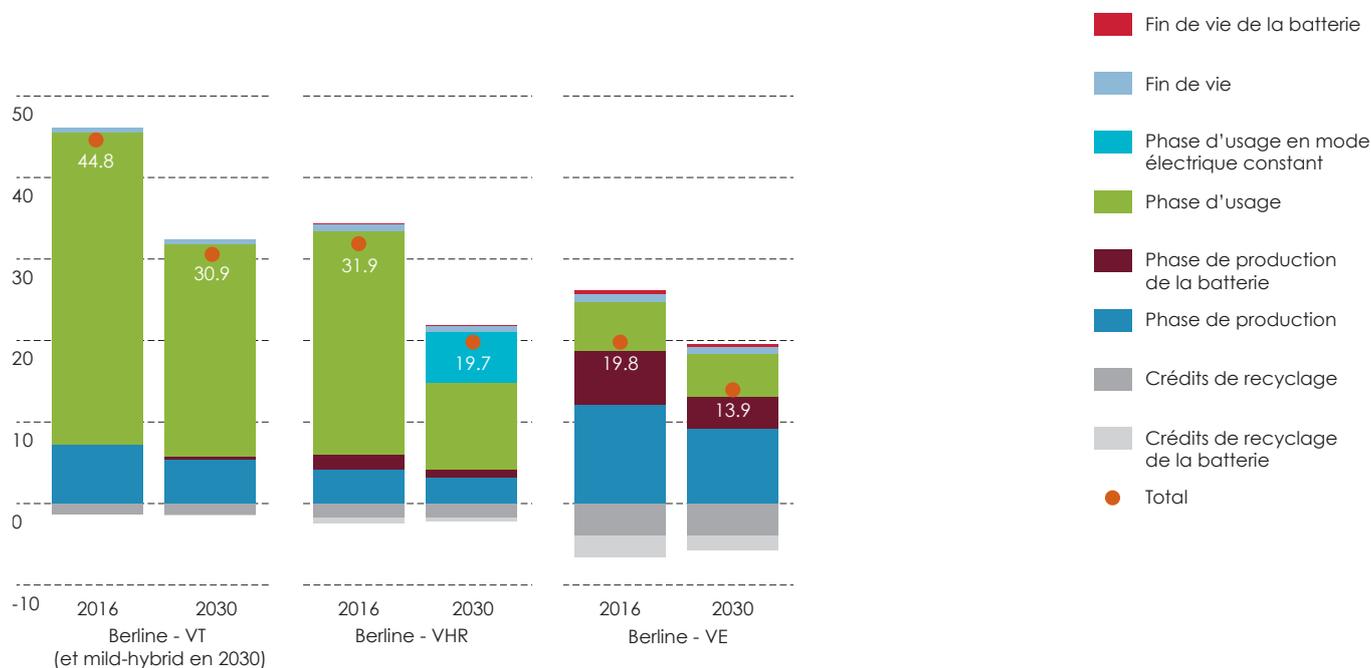


Figure 2
Potentiel de réchauffement global : résultats 2016-2030 comparés sur le segment des berlines (t CO₂-eq.)

exemple les horaires auxquels le véhicule se charge ou encore la température extérieure (le taux marginal de l'intensité carbone étant plus élevé). La fermeture des centrales au charbon, prévue pour 2023 et l'installation de nouvelles capacités d'énergies renouvelables en remplacement des centrales nucléaires ou fossiles françaises, et la maîtrise, voire la baisse de la consommation d'électricité, permettra de réduire d'autant l'impact déjà limité de la phase d'usage.

En 2016, selon l'analyse de cycle de vie réalisée, une citadine électrique émet en moyenne 63% de moins de gaz à effet de serre qu'une citadine essence (12 t CO₂-eq. et 33 t CO₂-eq.) sans prendre en compte les crédits de recyclage et 70% de moins en incluant ces crédits (10 t CO₂-eq. et 32 t CO₂-eq.). Une berline électrique émet en moyenne 44% de moins qu'un véhicule diesel de la même gamme (26 t CO₂-eq. et 46 t CO₂-eq.) sans prendre en compte les crédits de recyclage et 57% de moins en incluant ces crédits (19 t CO₂-eq. et 45 t CO₂-eq.). A titre de comparaison, l'empreinte carbone d'un Français sur l'année 2015 était de 10,2 t CO₂-eq.⁴.

L'étude montre comment l'évolution du mix électrique de la France d'ici à 2030 peut faire varier les émissions liées à l'usage du véhicule électrique.

Dans un contexte où la France n'atteint pas ses objectifs de transition énergétique pour 2030, et recourt de manière accrue aux énergies fossiles (à hauteur de 19% du mix électrique), la consommation de ressources fossiles et la contribution au changement climatique des véhicules (sur l'ensemble de leur cycle de vie) augmentent d'environ 20%, leur potentiel d'acidification des milieux naturels de 13%. Néanmoins, lorsque la part d'énergies renouvelables passe de 39% à 43% de la consommation d'électricité, tous les impacts des véhicules électriques et des véhicules hybrides rechargeables diminuent de 5% en moyenne, pour les citadines et les berlines.

Ainsi, dans le scénario 1 Ambition Transition Energétique, l'empreinte carbone d'une voiture citadine 100% électrique utilisée pendant 10 ans, et sur l'ensemble de son cycle de vie, reste relativement stable, à 10,4 t CO₂-eq. (Figure 2). Quant à la berline, elle voit dans ce scénario son empreinte carbone baisser, de 26 t CO₂-eq. en 2016 à 19 t CO₂-eq. en 2030 (Figure 3). Ce scénario intègre une évolution tendancielle de la capacité et de l'efficacité des batteries, une hybridation « légère » des véhicules thermiques et une amélioration de l'efficacité énergétique des modes de production.

4 Les chiffres clés du Climat, France Europe et Monde - Edition 2018, Commissariat général au développement durable, I4CE, Ministère de la transition écologique et solidaire..



Dans le cadre du scénario 2, Accélération Energies Renouvelables, l'empreinte de la voiture citadine électrique, par exemple, pourrait être réduite à 6 t CO₂-eq. sur l'ensemble de son cycle de vie (en incluant les crédits de recyclage). Ce scénario mise sur la baisse de la masse des batteries, et donc de la quantité de matières incorporées, et sur un taux important de recyclage des batteries (85%).

Dans le scénario 3 Renoncement Politique, l'empreinte de la berline VE augmente de 2,4 t CO₂-eq. à l'horizon 2030, pour atteindre 27 t CO₂-eq.

L'empreinte carbone des véhicules hybrides rechargeables, intermédiaires entre les thermiques et l'électrique, est quant à elle particulièrement sensible à la part des kilomètres effectués en mode électrique, par rapport à la part effectuée en mode thermique.

Pollution de l'air

En roulant, le véhicule électrique se distingue du véhicule thermique par l'absence d'émissions de polluants (dioxydes d'azote et particules) à l'échappement, et **permet ainsi une amélioration de la qualité de l'air en milieu urbain**. Le phénomène d'abrasion des pneus, des revêtements routiers ou des freins, n'est pas supprimé. Néanmoins, **la réduction des émissions est significative et représente un atout indéniable pour la qualité de l'air, notamment en milieu urbain**. Selon l'étude publiée en 2015, « En route pour un transport durable », à l'échelle d'un parc de 4,4 millions de véhicules électriques en 2030 (dont VHR), les émissions à l'échappement de polluants atmosphériques des véhicules légers en France pourraient être réduites d'environ 72% pour le NO_x et de 92% pour les particules fines (PM₁₀).

Les enjeux de l'économie circulaire pour la filière du véhicule électrique

L'étape de fabrication des véhicules électriques, y compris de la batterie, concentre une part importante des impacts environnementaux. En moyenne pour les véhicules étudiés, 75% de leur contribution au changement climatique ou de leur potentiel d'acidification des milieux naturels sont liés à la phase amont. Dans un contexte de forte croissance du marché du véhicule électrique d'ici à 2030, les 4 leviers principaux identifiés pour maîtriser et réduire cet impact se situent au niveau 1) des activités d'extraction de matières minérales, 2) de l'efficacité des modes de production, 3) de l'évolution des batteries en termes d'efficacité, de masse et d'usage et 4) du renforcement des pratiques de recyclage.

Les véhicules particuliers, électriques ou thermiques, ont un impact environnemental important du fait des matières premières qu'ils mobilisent pendant leur fabrication (sans compter leur utilisation). De ce point de vue, la filière automobile classique a optimisé les processus de production, et a atteint des taux de recyclage des matières allant jusqu'à 85%, avec une valorisation et une réutilisation directe des matières entrantes. Les gains d'efficacité énergétique constatés depuis quinze ans équivalent à 2% par an. Pour les véhicules électriques, la batterie représente une boucle de production supplémentaire qu'il faut prendre en compte.

La production des batteries a des impacts tout d'abord sur les territoires, là où les ressources minérales (lithium, cobalt, nickel, manganèse) sont extraites et traitées. Ces activités sont aujourd'hui principalement localisées dans des pays en développement. Les cellules sont transformées aujourd'hui essentiellement en Asie. Les potentiels d'acidification des milieux naturels et d'eutrophisation des eaux sont les deux indicateurs utilisés dans cette étude pour mesurer les impacts sur les écosystèmes. Ces phénomènes ont pour effet d'appauvrir les milieux naturels et d'affecter la faune et la flore, à une échelle locale ou régionale. En 2016, le véhicule électrique représentait entre 8 et 15% du potentiel d'acidification d'un Européen moyen, en fonction du type et du segment de véhicule. Les conséquences de la production des véhicules électriques sur les milieux naturels doivent donc être considérées avec vigilance dans un contexte de production en forte croissance.

Les gains d'efficacité énergétique ont un effet baissier direct sur l'empreinte environnementale des véhicules. En suivant la tendance observée depuis plus d'une dizaine d'années par les constructeurs, jusqu'à 25% de gains d'efficacité énergétique sur les modes de production pourraient être envisagés d'ici 2030.

Le rôle clé des batteries

Bien que difficile à prévoir, il est probable que l'évolution des batteries d'ici 2030 suive à la fois les tendances observées de croissance de l'autonomie et de l'efficacité, tout en suivant des trajectoires différenciées entre les gammes de véhicules. Cette tendance pourrait notamment être accélérée par une demande forte pour des véhicules abordables avec une autonomie limitée (citadines) d'une part, et d'autre part par une demande pour des véhicules performants à grande autonomie, mais plus onéreux (berlines). Les choix technologiques actuels qui définissent les types de batteries en circulation dans 10-15 ans et au-delà, détermineront le niveau de mobilisation des ressources naturelles et les impacts associés à la transformation des matières premières.

L'analyse compare donc trois trajectoires d'évolution des batteries. L'hypothèse tendancielle prend en compte une capacité comprise entre 50kWh pour les citadines VE et 90kWh pour les berlines VE. Selon une seconde hypothèse de croissance maximale, la capacité des packs augmenterait jusqu'à 60kWh pour la citadine et 120kWh pour la berline. Enfin selon une hypothèse de « rupture » vers des batteries plus petites et compactes, les capacités disponibles sont comprises entre 30 et 60 kWh.

Il en ressort qu'une croissance maximale de la capacité, associée à une plus grande autonomie et à une masse plus importante des batteries augmente les impacts des citadines d'ici 2030 sur l'acidification des milieux naturels. Pour les véhicules hybrides rechargeables (VHR) cet impact est augmenté de 20 à 30% par rapport à une évolution tendancielle. Selon cette trajectoire de croissance, les impacts sur l'eau (eutrophisation) sont également en hausse, pour plus de 20% pour les VHR. L'hypothèse de (rupture) présente en revanche une opportunité de réduction des impacts environnementaux des batteries, sur l'eau, les milieux naturels et le climat. Dans le cas où la masse des batteries diminue, la quantité de matières, extraites puis traitées diminue. Ainsi, les impacts associés diminuent également.

Le recyclage des batteries

Le recyclage des composants de la batterie est un vecteur important pour la réduction de l'empreinte environnementale du véhicule. En Europe depuis 2006, la loi impose aux sociétés automobiles de recycler au moins 50 % de la masse des batteries lithium-ion⁵. Sont notamment recyclées de manière privilégiée les ressources minérales (cobalt, manganèse, nickel, cuivre, lithium), même si elles ne sont pas réutilisées en circuit fermé, pour la production de batteries neuves. 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. Il est qualifié en « crédits de recyclage ». Ceux-ci représentent entre un quart et un tiers de l'impact du véhicule sur l'ensemble du cycle de vie.

L'augmentation du taux de recyclage obligatoire permettrait d'élargir la gamme de matières récupérées (plastiques et aluminium par exemple).

Elle permettrait également, de réduire les impacts sur les milieux naturels et l'oxydation de l'air par l'ozone (création d'ozone photochimique). Enfin, le recyclage en boucle fermée peut apporter une solution à la fois à la criticité de certaines ressources minérales, qui si elle n'a pas été évaluée dans cette étude fait l'objet de préoccupations particulières, et à la dépendance économique et stratégique de la filière automobile vis-à-vis de ces matières. En effet, la problématique des ressources minérales nécessite d'observer spécifiquement, de manière prospective, la filière de production des batteries, sous l'angle économique, géostratégique, et la responsabilité des entreprises.

Par ailleurs, les atouts environnementaux des véhicules électriques peuvent, selon l'analyse proposée ici, être renforcés, en maximisant l'usage des batteries pour la mobilité (partage de véhicules et augmentation du kilométrage).

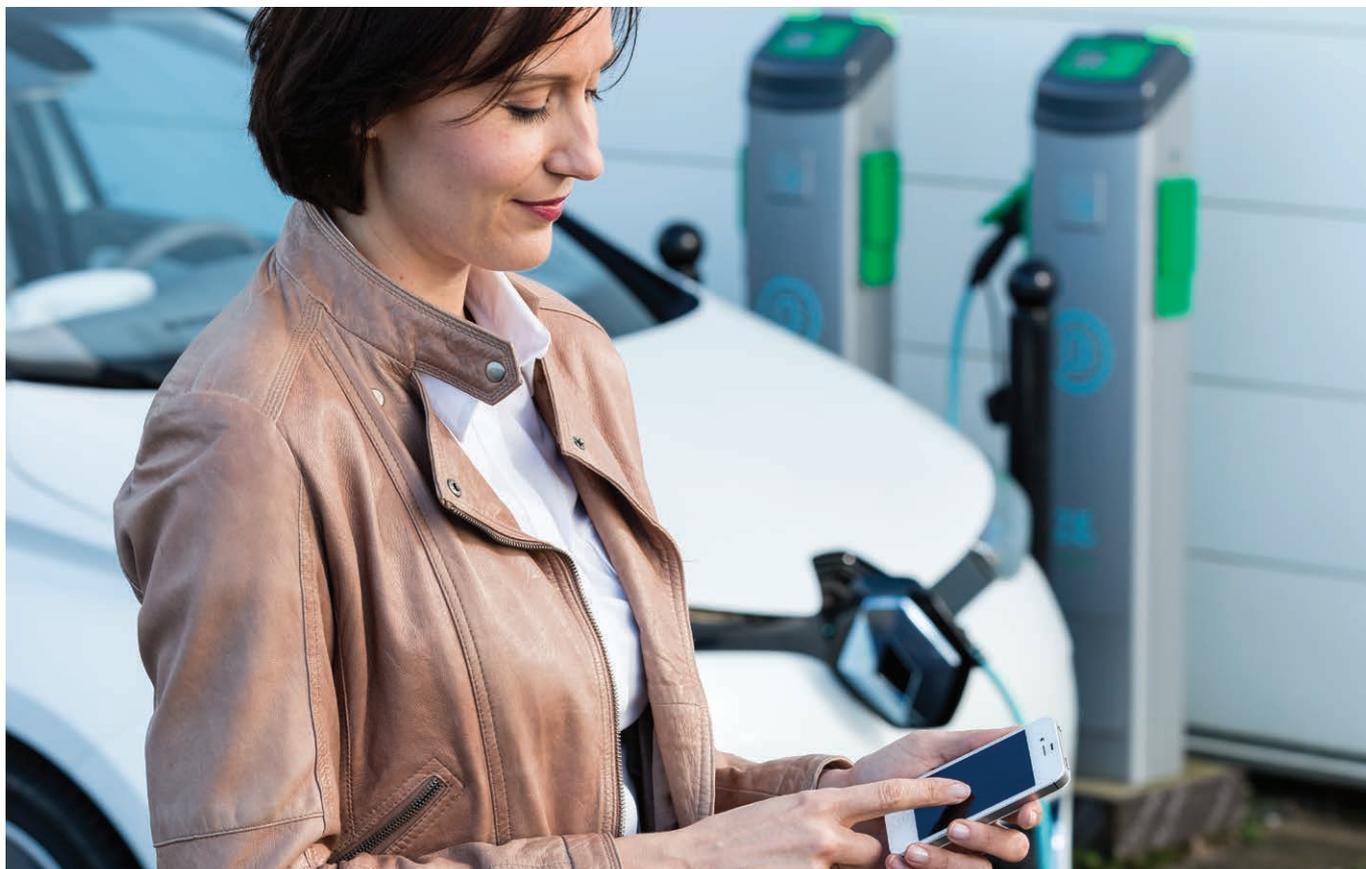
Les batteries produites pour la mobilité ont en effet une résistance suffisante sur leur durée de vie pour que leur usage s'intensifie. Les échanges d'énergie peuvent être doublés sur une même durée de vie pour certaines batteries, sans que leurs performances ne soient dégradées.

La variation du kilométrage a de fait un effet limité sur l'impact carbone des véhicules électriques. Ainsi pour les véhicules 100% électriques, la variation à la hausse de 20% du kilométrage se traduit par une hausse de 5% de l'impact total de la citadine, et de 8% de la berline. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer les impacts dans le cas où un remplacement de la batterie serait nécessaire du fait d'un kilométrage plus important des véhicules. Une augmentation de 60% des kilomètres parcourus conduit potentiellement à une hausse significative de l'impact, de plus de 30%, générée par le remplacement de la batterie. La multiplication du kilométrage dans les mêmes proportions pour les véhicules thermiques considérés dans l'analyse, implique un doublement de l'empreinte carbone. L'avantage du véhicule électrique se maintient donc ici vis-à-vis de son équivalent thermique, y compris en prenant en compte les émissions liées à la production de la batterie.

⁵ La Directive 2006/66/CE du Parlement Européen et du Conseil du 6 septembre 2006 relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs et abrogeant la directive 91/157/CEE définit dans l'annexe III – Partie B les rendements minimaux de recyclage : « au moins 50 % de la masse moyenne des autres déchets de piles et d'accumulateurs. »



Le véhicule-to-grid, moyen complémentaire de flexibilité pour le système électrique



L'électromobilité crée des défis et des opportunités pour le système électrique français. En premier lieu celui de la maîtrise des consommations d'électricité. Elle offre des moyens de flexibilité complémentaires au système électrique, par le biais notamment du « V2G ».

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, et contribuer au développement des énergies renouvelables et à une sortie progressive des énergies fossiles et nucléaire.

L'analyse prospective évalue donc en premier lieu le potentiel offert par la recharge « intelligente », aussi appelée « optimum carbone » pour limiter la consommation supplémentaire d'électricité et les émissions de CO₂. Dans ce cas de figure, les charges du matin et du soir au moment du pic de consommation sont maîtrisées et étendues aux heures de travail ou déplacées pendant la nuit (Figure 4). Il est à noter que le recours à l'intelligence des réseaux est sensible aux usages et aux modes de charge et de décharge des batteries par les propriétaires d'un

véhicule et par les gestionnaires de flottes. Ces pratiques peuvent dans certains cas faire varier la durée de vie des batteries. Les comportements de charge et de décharges, par exemple en conservant un état de charge minimal de la batterie, permettent de limiter ces impacts.

L'étude prend également en compte les services que peuvent rendre les véhicules au système électrique et à l'intégration des énergies renouvelables, par le biais d'échanges bidirectionnels, appelés *vehicle-to-grid* « V2G ». Les véhicules sont amenés à soutirer de l'électricité supplémentaire à celle nécessaire pour leurs besoins de mobilité, et à la restituer (en considérant une perte de 10%) au moment le plus opportun, ce qui apporte une réponse à la variabilité des énergies renouvelables. Bien qu'il soit difficile d'anticiper la vitesse de déploiement de ce type de services, ainsi que les modalités de charge et la capacité du réseau à absorber ces flux d'énergie, les premiers retours d'expériences permettent d'identifier un potentiel. Celui-ci comprend un soulagement des pics de consommation, en journée ou la nuit, une maîtrise des surcharges, des niveaux de tension et de la fréquence électrique, en absorbant les surplus

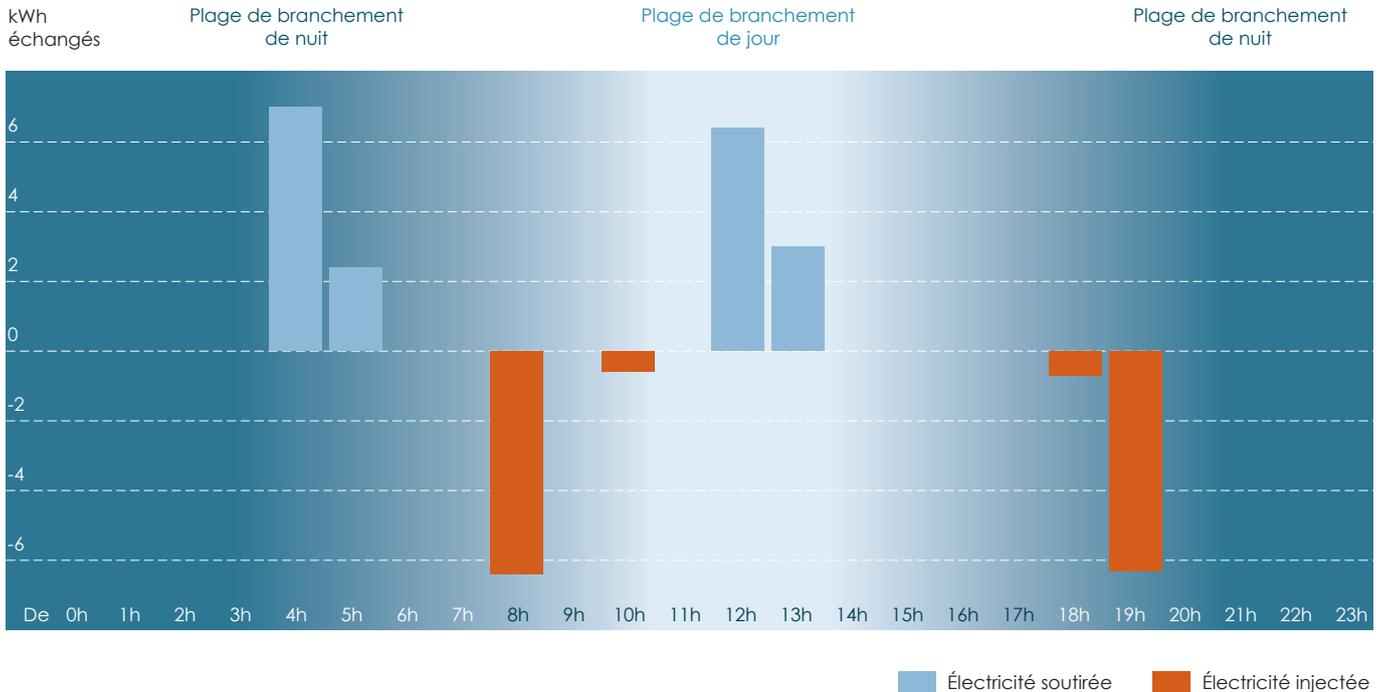


Figure 3
Echanges bidirectionnel d'électricité (V2G) d'une citadine électrique pendant une journée d'hiver

Ce graphique présente un cas d'usage de V2G pour la citadine VE sur une semaine d'hiver dans le cadre du scénario n°1, Ambition Transition Energétique. 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 injecte de l'ordre de 6 kWh. Le véhicule se recharge à des moments où le système électrique est moins contraint, entre 12h et 14h et entre 4h et 6h dans le cas illustré.

d'énergie produite, notamment de manière intermittente, à partir de panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes.

Ces services prennent sens lorsqu'ils sont mesurés à l'échelle d'un parc automobile de plusieurs millions de véhicules. Dans le scénario 1, Ambition Transition Energétique, les objectifs de la loi de transition énergétique sont atteints et 4,4 millions de véhicules électriques sont en circulation. Si l'ensemble des charges sont « naturelles » (c'est à dire non pilotées), la consommation d'électricité est alors estimée entre 11,3 TWh et 12,4 TWh par an en incluant un taux de perte de 10% à la charge. Dès lors que la charge des véhicules électriques est pilotable (pour être retardée ou anticipée), il est possible de limiter le recours aux énergies fossiles et de mettre les véhicules au service

du système électrique en lui apportant de la flexibilité. Dans le scénario 1, 40% des charges sont réalisées en « optimum carbone », et 30% des véhicules réalisent des échanges bidirectionnels en V2G. La consommation qui peut être dans ce cas décalée en dehors des périodes de pointe sur l'année représenterait alors plus de 7 TWh par an. Si l'on considère les bénéfices du V2G de manière isolée, dans les mêmes conditions, ce sont près de 3 TWh dans l'année qui pourraient être réinjectés dans le réseau.

Cette énergie pourra être valorisée pour sécuriser l'approvisionnement et se substituer à des sources d'énergies fossiles utilisées en appoint comme réserve d'énergie primaire et secondaire. C'est un moyen flexible et rapide de gérer des aléas sur le système électrique.

En complément, l'analyse prospective permet d'estimer le « gisement de réserve » des véhicules électriques. En effet, la capacité des batteries est nettement supérieure à la portée des trajets effectués par les véhicules dans la journée. Lorsqu'après une journée de déplacements les véhicules électriques sont branchés sur un point de recharge à domicile, ils conservent dans leur batterie une énergie résiduelle. Cette énergie pourrait être mobilisée pour soutenir les moyens de production électrique en cas de forte demande nationale d'électricité. Pour 4,4 millions de véhicules modélisés, l'étude estime un potentiel

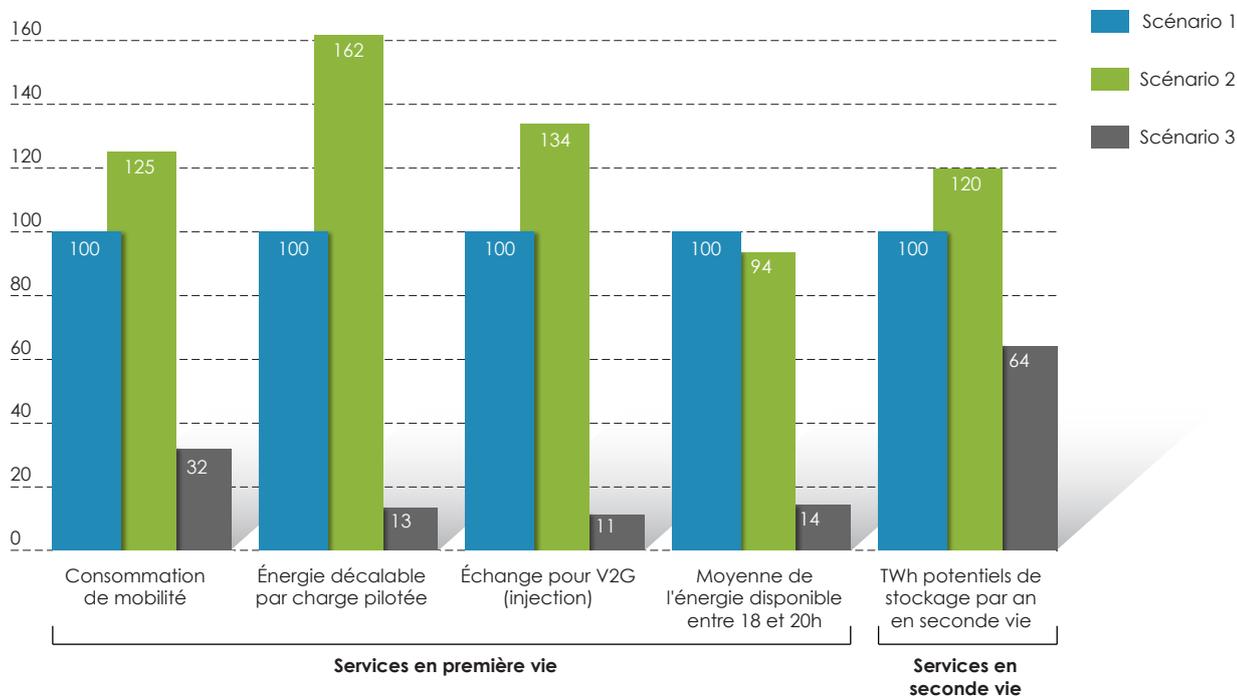


Figure 4
Potentiel des services rendus au système électrique comparé entre les scénarios (base 100).

technique maximal en 2030 de près de 45 GWh sur la plage horaire 18-20h lors d'un jour d'hiver moyen en France, dont une partie pourrait être mobilisée très rapidement. Le véhicule électrique apparaît alors comme un moyen supplémentaire de flexibilité pour équilibrer le système électrique, et éviter d'éventuelles coupures.

Il s'agit d'une quantité d'énergie importante étant donné que la consommation varie entre 60 et 80 GWh par heure pour une journée d'hiver par exemple. Ce gisement maximal de réserve 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 » utilisable en totalité en cas de forte nécessité, qui ne peut être mobilisé qu'à quelques moments dans l'année et à une vitesse qui ne peut excéder les puissances unitaires des points de recharge. Il est raisonnable d'estimer que seule une fraction de ce potentiel (par exemple 10%) serait soutirée en cas de besoin par les gestionnaires de réseaux.

La comparaison des scénarios permet d'identifier les conditions nécessaires à l'échange bidirectionnel

d'électricité, ou V2G. La charge bidirectionnelle doit en effet être pratiquée par une part significative du parc ; être intelligemment gérée (ici via l'optimum carbone) ; s'inscrire dans le cadre d'une adaptation des batteries et des infrastructures aux usages des automobilistes (fréquence d'utilisation, besoins réels d'autonomie).

Seuls les scénarios qui atteignent les objectifs de la loi de transition énergétique permettent de réaliser un niveau de services au système électrique significatif, notamment grâce au V2G. Un niveau de déploiement insuffisant du véhicule électrique et des infrastructures dédiées, ne permet pas d'envisager le recours à la fonction secondaire des batteries et représenterait un manque à gagner pour favoriser la transition énergétique en France.



max. 20kW
1P+N+E
B-Muster
Typ. Beltef.

Hold dit mobil
på ladestanden
Lampen lysner
Sæt kablet i



Du kan også
Ring til vores
702 702 1611

Les batteries de seconde vie, moyen de stockage des énergies renouvelables

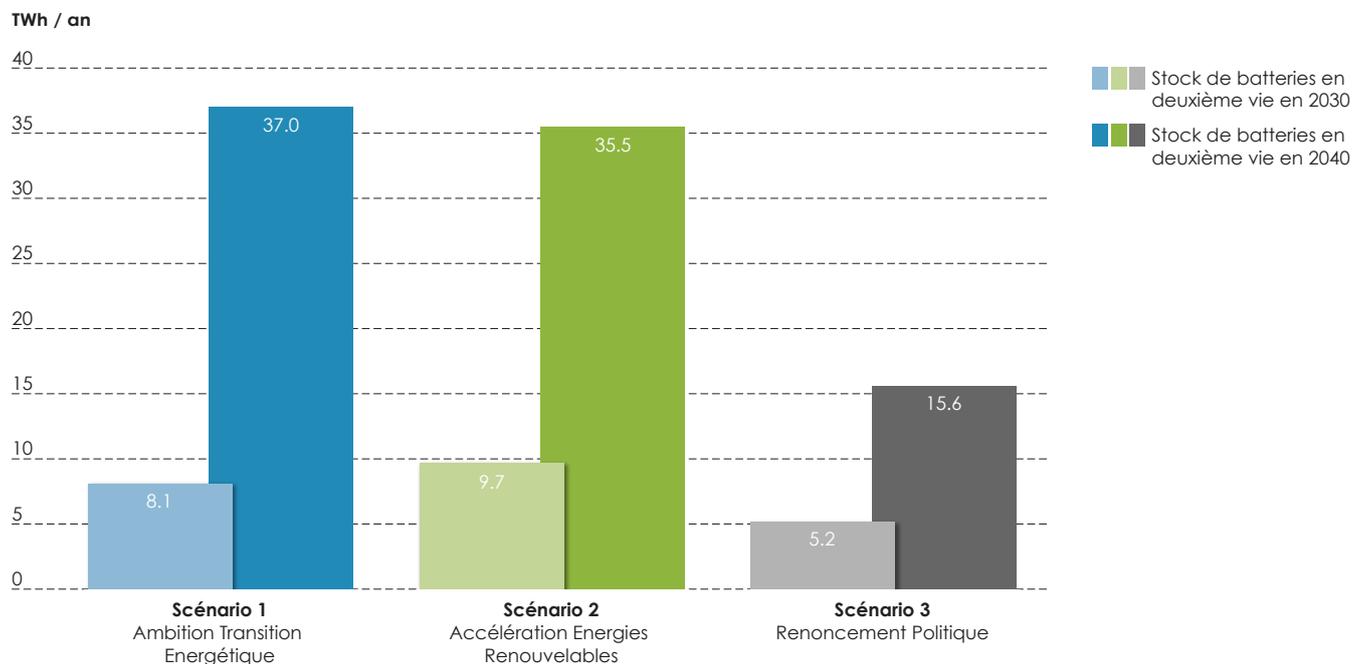


Figure 5

Capacité de stockage et de réinjection en seconde vie comparée entre les scénarios

Quand une batterie a perdu une partie importante de sa capacité initiale, elle peut être collectée et reconditionnée pour servir de moyen de stockage d'électricité, par exemple dans un bâtiment. L'énergie renouvelable peut alors être stockée au moment où elle est en surplus, puis être réinjectée quand la demande électrique est importante, ou servir pour des usages d'autoconsommation. La seconde vie prolonge ainsi l'usage des batteries de manière significative, au-delà de sa première vie dédiée à la mobilité.

L'étude prend en compte une durée de 5 ans pour cette seconde vie, en ayant considéré les retours des expérimentations en cours. Il est important de noter que cette durée est sensible à l'usage qui peut en être fait, aux modalités de charge et de décharge.

Par ailleurs, l'objectif principal a été de proposer une première évaluation des capacités que pourrait fournir un volume significatif de batteries en seconde vie. Les aléas liés à la collecte, les impacts de la phase de reconditionnement avec l'intégration d'un nouveau système de gestion de la batterie n'ont pas été étudiés ici. Ils sont identifiés comme des éléments clés à considérer pour le prolongement de la seconde vie, et

l'approfondissement de la réflexion initiée dans cette analyse.

Le nombre de batteries effectivement en seconde vie en 2030 est évalué dans l'étude sur la base du stock de véhicules électriques dans le parc en 2020. Pour un stock de batteries d'environ 960 000 unités⁶, cela représenterait une capacité de stockage de 8 TWh par an. Si toutes les batteries du stock de véhicules électriques en 2030 sont utilisées pour du stockage stationnaire 10 ans après leur mise sur le marché (4,4 millions de batteries en seconde vie), la capacité de stockage représenterait environ 37 TWh par an.

La capacité de stockage évolue entre 5 et 10 TWh par an en 2030 entre les scénarios. En 2040, sur la base d'un cycle complet par jour de la batterie, les potentiels de stockage et de réinjection sont de l'ordre de 15 à 37 TWh par an. Si la situation en 2030 n'est que peu contrastée entre les trois 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 vu comme un point de passage dans la transition énergétique à l'horizon 2050. Le rythme de déploiement des véhicules électriques jouera un rôle majeur pour le déploiement de cet usage de stockage.

⁶ Ce chiffre correspond au nombre de véhicules électriques (VE et VHR) en circulation en 2020, dont les batteries arrivent en seconde vie en 2030. Source : Stratégie nationale de mobilité propre, PPE 2016. (Cf. Chapitre méthodologie)

Références bibliographiques

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.

Batteries 2020, « Testing and ageing protocols for second life batteries. Understanding degradation », 2016.

BAUER 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.

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.

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.

PILLOT C., Avicenne Energy, « The rechargeable battery market and main trends 2015-2025 », 2016

RTE, « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande de l'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 .

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.

Rappel des indicateurs d'impact

Cette analyse de cycle de vie est multicritère. Elle mesure tout au long du cycle de vie des véhicules les impacts suivants :

La consommation de ressources fossiles, exprimée en MJ. Quantité d'énergie fossile consommée sur le cycle de vie du véhicule.

L'acidification des milieux naturels, exprimée en kg SO₂-eq. Acidification des écosystèmes causée par la combustion d'énergies fossiles.

Le potentiel de réchauffement global, exprimé en t CO₂-eq. Contribution des gaz à effet de serre sur le réchauffement de la planète.

Le potentiel d'eutrophisation des eaux, exprimés en kg PO₄-eq. Apport excessif de produits phosphatés ou azotés qui encouragent la croissance rapide d'algues

La création d'ozone photochimique, exprimée en kg C₂H₄-eq. Transformation de polluants atmosphériques en ozones et autres composés oxydants.

Rappel des abréviations pour les véhicules

VT : Véhicule Thermique

VHR : Véhicule Hybride Rechargeable

VE – REX : Véhicule Electrique Range Extender

VE : Véhicule 100% électrique

European Climate Foundation (ECF)

La Fondation Européenne pour le Climat (European Climate Foundation) est une « fondation de fondations » créée en 2008. En tant qu'organisation philanthropique, elle a pour mission de lutter contre le changement climatique en Europe en promouvant des actions nationales et européennes qui réduisent de la manière la plus efficace possible les émissions de gaz à effet de serre.

Fondation Pour La Nature Et L'homme (FNH)

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.

Les résultats de l'étude éclairent les enjeux du déploiement de l'électromobilité dans le cadre de la transition écologique en France. Ils confirment l'intérêt d'une vision intégrée des enjeux environnementaux, climat, eau, sols, milieux et ressources naturelles dans un système de mobilité en pleine transformation. Les scénarios préconisent une attention toute particulière à la cohérence entre la transition énergétique et le déploiement de l'électromobilité. Enfin, ces travaux pourront nourrir des réflexions plus larges sur la transition vers un transport « propre », les nouveaux usages des véhicules et les modèles de services à la mobilité, la responsabilisation des filières depuis l'extraction des minerais jusqu'au recyclage et sur le développement des « réseaux intelligents ».

Conditions d'utilisation

Ce rapport peut être distribué librement, en partie ou dans son intégralité. Aucune reproduction d'une quelconque partie de ce rapport ne peut être vendue ou distribué à des fins commerciales, ni être modifiée ou incorporée à des fins publicitaires. L'utilisation des informations contenues dans ce rapport requiert d'en citer explicitement la source.

