Revue bimestrielle réalisée avec le concours des membres de la Société des Ingénieurs de l'Automobile

INGÉNIEURS DE L'AUTO

FÉVRIER 2023 # 881

L'Interview

Yves Bonnefont, Chief Software Officer Stellantis

Plein Feux

L'injection directe H_2

Dossier

Électrique et thermique, au banc du bilan de l'ACV

Congrès et conférences

Congrès CESA 2022
Colloque Regards Croisés sur les mobilités automatisées
J.E Iso 26262

SIA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE

Sommaire

22
Plein feux
Injection directe d'hydrogène, pour moteurs à haute puissance spécifique

39
Le Dossier
Électrique et thermique, au banc du bilan de l'ACV

12
L'Interview
Yves Bonnefont, Chief Software Officer de Stellantis

Le software constitue un excellent outil pour renforcer l'ADN des marques

6 Focus
Euro 7 : nouveaux polluants, neutralité technologique et conditions de mesures élargies, proposés pour une entrée en vigueur en juillet 2025

8 Nouveaux talents
La Ferromobile réconcilie le rail et la route pour favoriser la mobilité en zones rurales

10 Une école, des projets
Deux projets pilotés par des étudiant(e)s ingénieurs de l'ESTACA

12 L'Interview
Yves Bonnefont, Chief Software Officer de Stellantis

18 L'actu en brèves

22 Pleins feux
Injection directe d'hydrogène, pour moteurs à haute puissance spécifique

24 SIA Congrès / Conférences
- **Quels regards nouveaux se sont croisés à l'occasion du webinaire sur les mobilités automatisées ?**
- **Normes safety, s'organiser pour répondre au foisonnement des exigences**
- **Congrès CESA 2022, électronique et automobile face aux défis environnementaux**

39 Dossier
ACV, Électrique et thermique à l'épreuve du cycle de vie !

56 Le cahier des entreprises

Editeur : Société des Ingénieurs de l'Automobile • Immeuble "le Gabriel Voisin" - 79 rue Jean-Jacques Rousseau - 92158 Suresnes Cedex • T. : 01 41 44 93 70 F. : 01 41 44 93 79 • © Ingénieurs de l'Automobile 2015 • **Directeur de la Publication :** Frédéric Charon • **Directeur de la rédaction et coordination :** Hervé Gros **Rédacteurs :** Bertrand Gay, Yvonnick Gazeau, Vincent Gonin • **Direction artistique et maquette :** Eve Taberna • **Secrétariat de rédaction :** Pascale Richard • **Conférence de Rédaction :** Thierry Bourdon, Luc Bourgeois, Marie-Claude Buraux, Jacques Graizon, Noureddine Guerrassi, Bertrand Largy, Emmanuel Lescaut, Luc Marbach, Frédéric Martin • **Crédits Photos :** Ademe, Axle & Manufacturing, BMW, BorgWarner, Ember Climate, ESTACA, FEV, IFPEN, Mercedes-Benz, Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, Oreca (Pierre Simenel), Rohde & Schwarz, SIA, SICEF, Stellantis, Valeo, ZF • **Editeur Délégué : F.F.E.** 15 rue des Sablons - 75116 Paris • **Directeur de la publicité :** Yves BITAN • Tél. : 01 43 57 93 89 • yves.bitan@ffe.fr • **Assistante de fabrication :** Aurélie VUILLEMIN • Tél. : 01.53 36 20 40 • aurelie.vuillemin@ffe.fr • **Imprimeur :** Espace Graphic • **n°ISSN** 0020-1200

Diffusion Service abonnements 79 rue Jean-jacques Rousseau – 92158 Suresnes Cedex - abonnements@sia.fr – 01 41 44 93 70
Tarif au numéro : 25 € TTC • **Tarifs abonnement :** France métropolitaine 130 € TTC – Europe 149 € - Hors Europe, DOM TOM : 160 €

En ce début d'année, je suis heureux de vous présenter, au nom de la SIA, mes meilleurs vœux pour 2023, de santé pour vous et vos proches, et de succès dans vos projets personnels et professionnels.

L'année 2022 a vraiment confirmé le changement dans la structure du marché. En volume tout d'abord : en France avec 1,53 million de VP neufs vendus, nous sommes revenus au niveau du début des années 70 et de la première crise pétrolière, mais nous avons dépassé les 20 % de part de marché pour les véhicules électrifiés.

2022 a aussi été l'année de la formalisation des feuilles de route de décarbonation de notre industrie. À tous les niveaux - filière, constructeurs, équipementiers -, les trajectoires et les leviers vers le « zéro carbone net » sont identifiés et quantifiés. Il nous reste juste à les mettre en œuvre, et à communiquer vers le grand public sur ces solutions.

Vous trouverez dans ce numéro un dossier sur l'Analyse du Cycle de Vie, qui permet de bien comprendre les impacts du véhicule automobile, du berceau à la tombe. Clairement, il n'y a pas que la consommation d'énergie lors de l'utilisation qui compte !

Également au menu, un point sur le projet de norme Euro7 et ses enjeux. Espérons que les pouvoirs publics et les institutions, françaises et européennes, calment le rythme des évolutions réglementaires, et permettent ainsi à notre filière de déployer sa feuille de route dans un contexte stabilisé.

On parle beaucoup de la transformation digitale. Yves Bonnefont, Chief Software Officer de Stellantis, vous racontera comment le software va apporter de nouvelles fonctionnalités aux utilisateurs, et renforcer l'ADN des marques.

Enfin, vous découvrirez dans ce numéro une nouvelle rubrique, centrée sur les étudiants et leurs projets dans le domaine de l'automobile. Vous y verrez comment des jeunes, passionnés par les nouvelles technologies, créent des projets en cohérence avec leurs valeurs. Un vrai bain de fraîcheur et d'optimisme !

Alors, bonne lecture, papier ou digital ! Plus que jamais, la science et les technologies sont la clef de l'avenir de notre filière.

Luc Marbach – président de la SIA

NOUVEAU !

Une nouvelle rubrique ouverte aux projets de jeunes ingénieurs !

Efficacité énergétique, sens de la compétition, les élèves-ingénieurs ESTACA au cœur de l'avenir de l'automobile

L'ESTACA, l'École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile, forme des ingénieurs depuis 1925. Au cours de ce, presque, siècle fabuleux pour toutes les mobilités, elle a su faire évoluer le contenu et la forme de ses enseignements. Permettant de confronter les élèves aux différentes réalités, les stages et les projets y prennent une place de plus en plus importante. Deux projets, menés par l'ESTACA Formula Team et l'association PV3e, illustrent cette démarche et placent les futurs ingénieurs au cœur de l'automobile du 21ème siècle. « *Par nos projets, nous désirons offrir des solutions à l'industrie automobile. En tant que jeunes ingénieurs, nous apporterons la vision de notre génération sur les problématiques énergétiques* », souligne Thibaut Coubray, président du bureau de l'ESTACA Formula Team. Et Pierre Harzouz, président de l'association PV3e précise : « *Nous avons une passion qui est l'automobile, mais celle-ci évolue très vite. Ce monde est déjà très différent de ce que nous avons connu quand nous étions plus jeunes. L'évolution est très rapide et nous en serons les moteurs.* » Par l'utilisation des bonnes méthodes et technologies « *l'ingénieur ne met pas seulement en œuvre des solutions, il est l'une d'entre elles* », ajoute t-il ●

Bertrand Gay

PV3e SOIGNE LA FRUGALITÉ DE SON VÉHICULE GEMINI

Au début des années 80, un groupe d'étudiants de l'ESTACA imagine un nouveau challenge étudiant : la course énergétique. Son objectif est simple et peut se résumer en une ligne : construire le véhicule qui parcourra la plus grande distance avec un litre d'essence. Très vite, la course est un succès. Après deux premières éditions en 1984 et 1985 à Vincennes, Shell prend en charge son organisation et rebaptise la course, Shell Eco Marathon.

L'association PV3e est créée en 1989 et n'a cessé depuis d'y participer, construisant 12 véhicules et 4 générations de moteurs.

Après cette lignée de véhicules en catégorie prototypes, PV3e s'est tournée vers la nouvelle catégorie dite Urban-Concept. Celle-ci se rapproche d'une voiture courante avec un pilote en position assise, un volant et des cotes minimales d'habitabilité.

Baptisé Gemini, le véhicule développé par PV3e est doté d'une motorisation hybride. Le moteur électrique aide le moteur thermique, et ils fonctionnent indépendamment l'un de l'autre, sans liaison mécanique. Le moteur thermique est relié à la roue arrière gauche et le moteur électrique à la roue arrière droite. La gestion électronique pilotant la motorisation établit la stratégie moteur en fonction des phases de conduite. « Cela nous a amenés à réaliser d'importants programmes virtuels de stratégie de course pour choisir la meilleure », précise Pierre Harzouz. Le moteur thermique monocylindre quatre temps de 42 cm^3 a été entièrement mis au point par les élèves. Il développe 1 kW et fonctionne selon le cycle Atkinson pour en optimiser la consommation. Il devrait évoluer dans les prochaines années en se dotant d'une chemise et d'un revêtement de piston en céramique pour améliorer la thermodynamique.

Par ailleurs, afin d'abaisser les frottements entre les moteurs et le pneumatique, l'équipe dispose d'un banc permettant de réduire les pertes.

Comme pour l'EFT, le véhicule se transmet d'une équipe d'élèves-ingénieurs à celle de l'année suivante. L'actuel Urban Concept est né en 2019 et sa durée de vie est de 3 à 4 ans, car il est complexe. Pour viser une masse la plus réduite possible, la coque est en fibre de carbone. Elle a été réalisée par Faster, le spécialiste de la fibre de carbone. Parmi les autres partenaires du projet, notons SKF, Norelem, Hexcel, AVL et NGK ●

Cette nouvelle rubrique est destinée à mettre en avant des projets menés par des élèves ingénieurs dans le cadre de leurs études. Ingénieurs de l'Auto entend ainsi valoriser les idées et les convictions des jeunes qui seront, demain, les acteurs de la transformation de l'automobile.

L'ESTACA FORMULA TEAM PEAUFINE AÉRODYNAMISME ET LIAISONS AU SOL POUR SA QUATRIÈME VOITURE

Né en 2010 sous le nom d'ESTACA Eco Racing, le projet ESTACA Formula Team (EFT) vise à appliquer les connaissances des étudiants dans le cadre d'un projet concret. Il s'agit de développer une voiture de course concourant dans le cadre de la Formula Student. « Par tous ses aspects, concevoir, fabriquer et exploiter la voiture, ce projet nous permet de gagner en compétences », souligne Alex Salomon, son directeur technique.

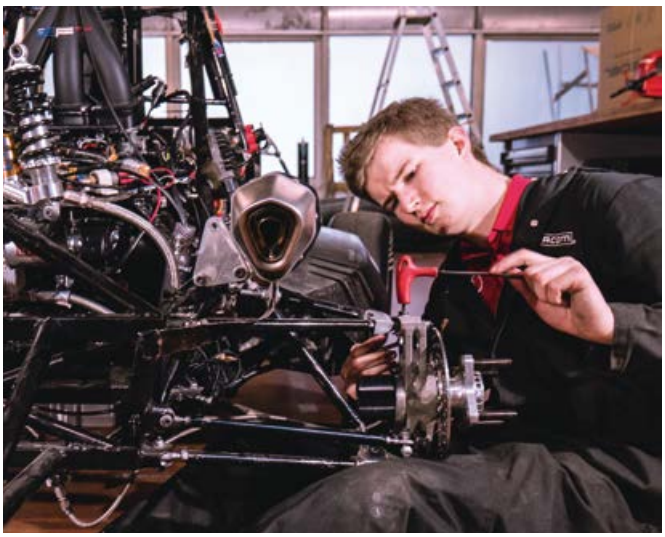
Pour cette année 2023, l'équipe travaille actuellement sur sa quatrième voiture, la EC 04. Celle-ci évolue nettement par rapport à la précédente, notamment dans le domaine de l'aérodynamique et des liaisons au sol. Le flux aérodynamique a été modélisé en utilisant des logiciels de CFD, et les pièces sont produites par l'équipe.

Côté liaisons au sol, l'EFT vient de faire produire des porte-moyeux en impression 3D titane par son partenaire Spartacus 3D. Ces pièces apportent une réponse à une préoccupation majeure : l'allègement. « Nous avons déjà gagné plus de 20 kg grâce à des liaisons au sol et des éléments de carrosserie en carbone », précise Alex Salomon. Autre évolution par rapport à la dernière version, le châssis reste mixte, monocoque carbone à l'avant et tubulaire à l'arrière, tandis que le moteur de Triumph Speed Triple est reconduit. Cette voiture sera la dernière à moteur thermique développée par l'équipe.

D'ores et déjà, l'EFT réfléchit à la version de 2024 en évaluant deux solutions de motorisations, électrique à batteries ou pile à combustible, au sein de projets PITA. « Certaines écuries concurrentes développent déjà des voitures avec pile à combustible », précise Thibaut Coubray. C'est notamment dans cet esprit prospectif que l'équipe de l'EFT, et de nombreux élèves ingénieurs de l'ESTACA, ont accueilli les acteurs du programme Mission H24 pour une conférence. Rappelons que ce projet a l'objectif de développer une voiture d'endurance à pile à combustible pour courir les 24 Heures du Mans. Les fructueux échanges ont permis aux étudiants de mieux comprendre certains enjeux liés à ce type de motorisation et au stockage d'énergie.

Mener de front l'ensemble des tâches - conception, fabrication, exploitation - pour la voiture de cette année, tout en envisageant dès maintenant 2024, demande un large panel de compétences et beaucoup d'organisation. L'EFT compte 60 membres dont 45 sur les domaines techniques répartis en cinq pôles : architecture véhicule et châssis, liaisons au sol, carrosserie et aérodynamique, GMP et enfin, faisceau électrique et données.

L'EFT souhaite, cette année, participer à l'épreuve de Formula Student qui se tiendra sur le circuit d'Hockenheim ●



Dossier réalisé par Vincent Gonin

ACV, ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE À L'ÉPREUVE DU CYCLE DE VIE !

Haro sur le moteur thermique : l'Europe a décrété en octobre dernier son éviction des concessions à l'horizon 2035, et s'apprête à décocher une norme Euro 7 très restrictive pour 2025. Un bouleversement prévisible du marché automobile, au profit essentiellement de l'électrique. « Accord historique » pour les uns, « décision dogmatique » pour les autres, cette transition énergétique à marche forcée relance la controverse. Puisque l'objectif assumé de la mesure est de réduire l'impact du transport individuel sur le climat et sur l'environnement, il est tentant d'évaluer l'impact respectif des différentes chaînes de traction à l'aune d'un outil impartial : l'Analyse du Cycle de Vie ou ACV. Quels sont les atouts et handicaps respectifs de la propulsion thermique, de son homologue électrique, voire de l'hydrogène, à l'heure de réduire l'empreinte environnementale ? Comme souvent, la réalité est assez nuancée, et pourra réserver quelques surprises !

C'est aujourd'hui acté : en fixant à 2035 la fin de la vente des véhicules particuliers et utilitaires légers thermiques, l'Europe a été plus loin que le Plan climat lancé par le gouvernement français en juillet 2017. Une décision qui met l'automobile au pied du mur : condamnée à s'affranchir du pétrole, elle s'interroge, pour la seconde fois de son histoire, sur son mode de propulsion.

À la croisée des enjeux : les transports dans l'œil du cyclone

Bien positionnée dans l'ordre de succession, la mobilité électrique fait figure de favorite. Les ventes mondiales de véhicules électriques à batteries devraient ainsi avoisiner 9 millions en 2022, soit 12% du marché mondial. Il faut dire que l'électricité semble cocher toutes les cases. Alors que le GIEC tire la sonnette d'alarme du réchauffement climatique, elle apparaît comme un levier pour s'approcher des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. Sur le plan géopolitique et économique, une moindre exposition au pétrole est vue d'un bon œil à l'heure où la facture énergétique flambe et où la balance commerciale s'enfonce dans les abysses. Enfin, l'absence d'émissions à l'échappement constitue un gage d'amélioration de la qualité de l'air en ville.

Quelques chiffres hexagonaux accréditent l'importance des transports dans l'équation. Ils représentent un tiers (32%) de la consommation d'énergie finale en France, dont 2/3 (22%) imputables aux voitures particulières. Sur le plan climatique, ils sont à l'origine de 35% des émissions tricolores de CO_2. Enfin, ils contribuent à la pollution atmosphérique dont la réduction est un enjeu majeur de santé publique.

Un avènement contesté

Pourtant, des voix se sont rapidement élevées pour déplorer cette conversion énergétique à marche forcée. Rien d'étonnant à ce qu'elle déclenche de telles passions, tant le secteur des transports s'inscrit à la croisée d'enjeux stratégiques. Sur le plan géopolitique en premier lieu, beaucoup s'inquiètent, à juste titre, du risque de troquer une dépendance aux hydrocarbures contre une dépendance aux matières premières, évoquée dans notre dossier de juillet 2022 (#878).
Sur le plan économique et sociétal ensuite, d'autres s'alarment du tapis rouge déroulé aux acteurs asiatiques, historiquement bien mieux positionnés dans le domaine des batteries. Dans les allées d'un Mondial 2022 déserté par la plupart des acteurs traditionnels, cette appréhension était palpable. Plus ambitieux que jamais, les constructeurs chinois ont assuré le spectacle, au grand dam d'une industrie automobile européenne qui pèse 7% du marché de l'emploi dans l'UE, soit 13 millions d'emplois directs ou indirects.

Mais l'argument le plus efficace des détracteurs de l'électrique est, sans conteste, celui qui s'attaque à son bilan environnemental réel, puisqu'il sape la raison même de cette transition énergétique à marche forcée. Les transferts d'impacts associés à ce virage énergétique seraient-ils donc mésestimés ?

Une règlementation sévère, mais lacunaire ?

Force est de constater que l'argument est recevable. Si le texte condamne le bloc thermique (essence, diesel ou éthanol) au profit des propulsions électriques ou hydrogène revendiquées « zéro émissions », c'est au prix d'un raccourci majeur. Il se concentre en effet sur les émissions en phase d'usage, « du réservoir à la roue », en ignorant plusieurs phases de vie à l'impact majeur : la fabrication du véhicule et de sa batterie, gourmandes en ressources minérales, la production d'électricité, plus ou moins carbonée, ainsi que le démantèlement et le recyclage, plus ou moins complexes. Le mode de calcul prête donc indéniablement le flanc à la critique, d'autant que si les impacts du véhicule thermique sont généralement plus élevés à l'usage, ceux du véhicule électrique sont toujours supérieurs à la fabrication.
La dernière réglementation repose-t-elle donc sur un syllogisme, aux prémisses biaisées ? Pour intégrer ces enjeux dans une perspective plus large, rien de tel que l'ACV. L'occasion également d'identifier des pistes pour utiliser le plein potentiel économique et environnemental de chaque type de mobilité. Ce dossier occultera volontairement de nombreux enjeux économiques et sociétaux pourtant cruciaux, dont l'emploi, la géopolitique et la souveraineté industrielle, pour se concentrer sur les seuls aspects énergétiques et environnementaux.

L'ACV, juge de paix ?

L'analyse de cycle de vie (ACV) constitue la méthode de quantification environnementale la plus adaptée car la plus holistique :

La dernière réglementation repose-t-elle donc sur un syllogisme, aux prémisses biaisées ? Pour intégrer ces enjeux dans une perspective plus large, rien de tel que l'ACV.

elle comptabilise les impacts d'un système à chaque étape de son cycle de vie, et les aborde de manière multicritère. Normalisée aux niveaux international, européen et français, elle évolue constamment grâce aux travaux d'une communauté de dizaines de chercheurs. Elle constitue donc le meilleur outil pour éclairer la prise de décision environnementale en réduisant les biais.

Les étapes de l'ACV

Comme son nom l'indique, le calcul de l'ACV intègre le cycle de vie « du berceau à la tombe » : extraction des matières premières, production, usage, entretien et fin de vie.
Ce dossier considère donc la globalité du parcours du véhicule, hors construction des infrastructures. L'étape initiale compte l'extraction des matières premières et leur transformation, puis les phases de production (emboutissage, ferrage, peinture, assemblage) et enfin le transport, souvent par voie maritime. L'étape d'usage, étalée sur plusieurs années, cible l'utilisation du véhicule, rechargé régulièrement en électricité ou alimenté en carburant à la station-service. Le démantèlement et le recyclage du véhicule en fin de vie constituent l'ultime étape.

Les impacts considérés

Les impacts peuvent de leur côté être ventilés en plusieurs catégories : si la consommation d'énergie primaire, la contribution au changement climatique et l'usage de ressources fossiles sont les plus souvent évoqués, d'autres critères ne doivent pas être omis, tels que la déplétion des ressources abiotiques, le potentiel d'acidification, de toxicité humaine, de création d'ozone, ou encore d'écotoxicité terrestre. La difficulté consiste donc à la fois à quantifier précisément ces « externalités négatives », mais aussi à les pondérer malgré leur hétérogénéité…

Autant dire que cet exercice complexe relève de la haute voltige, tant sur les aspects méthodologiques que sur la qualité des données agrégées. Conformément à l'adage « *garbage in, garbage out* », le recueil des données d'entrée et leur précision conditionnent la pertinence du modèle. Ce dossier s'appuie donc sur plusieurs études documentées, et notamment celle menée par l'ADEME, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

ICE vs BEV : Périmètre et hypothèses

Afin d'évaluer les gains environnementaux générés par le véhicule électrique (VE), cet organisme a en effet réalisé en 2013 un bilan environnemental du cycle de vie complet du véhicule. Quoiqu'assez ancienne, l'étude fait toujours référence : nous en conserverons la méthode, tout en prenant soin d'en discuter les hypothèses et d'actualiser les résultats de manière étayée. Nous nous positionnerons donc dans une vision assez conservatrice de la mobilité électrique, une photographie en instantané qui, du fait de l'inertie des procédés, des économies d'échelle et de l'infrastructure, conserve une validité dans la décennie entamée. Point de recharge par induction noyée dans la chaussée, de cellules à électrolyte solide ni de technologie disruptive dans cette analyse.

L'étude originale se concentre sur des trajets inférieurs à 80 km par jour et pendant une durée de vie de 150 000 km, ce qui demeure représentatif de l'usage en Europe de l'Ouest. Le véhicule considéré est une citadine polyvalente (segment B), embarquant un pack batterie Nickel Manganèse Cobalt (NMC) de 24kWh, utilisée en France et en Allemagne, ce qui permet d'évaluer l'impact de différents mix électriques européens.

Discussion des hypothèses de l'ADEME

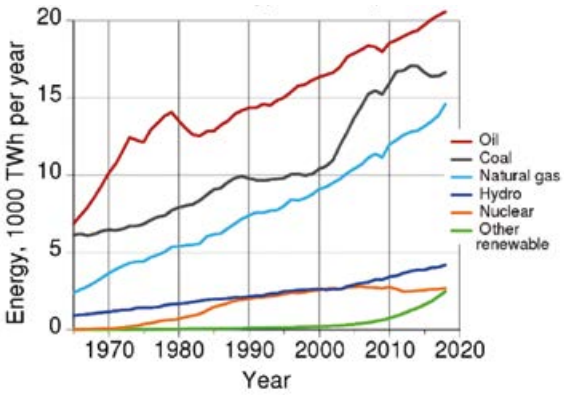
Certaines hypothèses formulées par l'ADEME impliquent des biais favorables à l'électrique, comme la production dans l'Hexagone du véhicule et de sa batterie. Un postulat peu généralisable, l'industrie automobile ayant depuis accéléré sa délocalisation, notamment vers des pays d'Europe centrale, d'Asie ou du Maghreb

Le mode de calcul prête donc indéniablement le flanc à la critique, d'autant que si les impacts du véhicule thermique sont généralement plus élevés à l'usage, ceux du véhicule électrique sont toujours supérieurs à la fabrication.

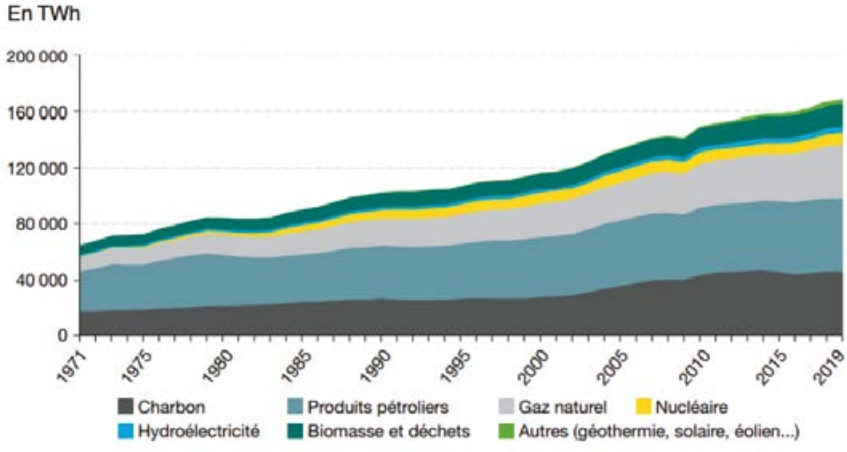
à l'énergie fortement carbonée. Plus spécifiquement, si le véhicule pris pour objet (Renault Zoe) est certes assemblé à Flins, ses cellules sont en réalité produites par LG en Pologne, au mix très carboné. Postulat également très favorable à l'électrique, la capacité de la batterie de 24kWh n'est plus d'actualité, le standard étant aujourd'hui du double (50kWh) sur ce segment de marché, voire compris entre 60 et 100kWh sur les segments supérieurs. Une évolution qui grève très sensiblement l'énergie grise lors des étapes de fabrication.

A contrario, certaines hypothèses assez conservatrices méritent d'être discutées. Le retour d'expérience permet aujourd'hui d'attribuer au véhicule électrique une longévité supérieure à celle du véhicule thermique, et donc de prolonger les courbes au-delà de 150 000km, ce qui donne au VE l'opportunité d'amortir son empreinte initiale. De la même manière, la démarche commune en ACV, consistant à considérer l'énergie primaire plutôt que l'énergie finale, s'avère défavorable au VE, et mérite d'être expliquée voire nuancée. Enfin, le « bouquet » ou « mix » électrique ayant une influence prépondérante sur les résultats, ce dossier étend la réflexion à d'autres aires géographiques et à l'évolution récente, très instructive !

WORLD ENERGY CONSUMPTION



CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE



***Source** : calculs SDES, d'après les données de l'AIE*

L'énergie : le nerf de la guerre

L'ACV s'intéresse en premier lieu à l'énergie. Mesurée en joules dans le système international, mais parfois en Watt.heure (Wh) ou en tonne équivalent pétrole (tep), l'énergie est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail, un mouvement, un rayonnement ou de la chaleur. Intimement associée au PIB, cette énergie, que certains comme J.M. Jancovici aiment à qualifier « d'aliment pour machines », constitue un bon indicateur de l'activité économique, laquelle peine à s'en découpler malgré tous ses efforts pour réduire son intensité énergétique.

L'usage est de distinguer l'énergie primaire, directement disponible à l'état naturel, de l'énergie finale disponible pour l'utilisateur. La production mondiale d'énergie primaire dépassait 600 EJ l'an dernier (167 PWh soit 14.3 Gtep), ce qui correspond à un triplement depuis 1971, et surtout à une multiplication par 40 depuis 1821 (350 Mtep). Cette énergie se répartit actuellement en 31% de pétrole, 27% de charbon, 24% de gaz naturel, 4,3% de nucléaire et 13,5% d'énergies renouvelables (hydroélectricité : 6,8% ; éolien, solaire, biomasse, géothermie, agro-carburants : 6,7%). La consommation mondiale d'énergie finale s'établit quant à elle à 425 EJ, dont 20% sous forme d'électricité, dont l'essentiel (61 %) demeure produite à partir... d'énergie fossile !

Le fossile toujours largement en tête

Cet examen des ordres de grandeur invite donc à nuancer l'idée reçue d'une transition énergétique en cours : loin de s'effriter, la consommation d'énergie fossile dépasse toujours 80% du mix énergétique mondial. De fait, le pétrole, le charbon, et même le gaz dominent sans partage le podium, le solde étant constitué par la biomasse, par le nucléaire, par l'hydraulique et très marginalement par le binôme éolien/solaire. Contrairement à une croyance répandue, les sources fossiles continuent même de croître vigoureusement en valeur absolue, l'exploitation du pétrole de schiste ayant notamment compensé l'érosion du pétrole conventionnel. Des statistiques qui mettent à mal l'idée d'une substitution des énergies carbonées par des alternatives décarbonées, et qui témoignent plu-

tôt d'une juxtaposition. Même la part des renouvelables stagne depuis 1990 (15% à 16,3%), le recul de la biomasse compensant la progression des autres EnR.

Coup de projecteur sur l'Hexagone

Qu'en est-il de la France ? Après une croissance continue jusqu'à 2005, la consommation d'énergie primaire de la France se tasse depuis une quinzaine d'année et évolue autour de 10 EJ (2,8 PWh ou 240 Mtep), soit 1,7% de la consommation mondiale, à mettre en perspective avec une consommation d'énergie finale de 5,8 EJ (1,6 PWh soit 140 Mtep). Une fois encore, les énergies fossiles dominent, avec plus de 46% du total, distribués entre le pétrole qui certes se contracte légèrement (28%), le gaz naturel qui se maintient (16%) et plus marginalement le charbon (3%). Notons que la part significative du nucléaire dans l'énergie primaire (4,1 EJ 1,2 PWh en 2021 soit 40%) est liée au mode de décompte, 2/3 de cette énergie primaire (uranium) étant dissipée sous forme de chaleur lors de la conversion en énergie électrique finale. La contribution de l'atome aux 532 TWh électriques d'énergie finale produits en 2021 s'établit ainsi à 361 TWh.

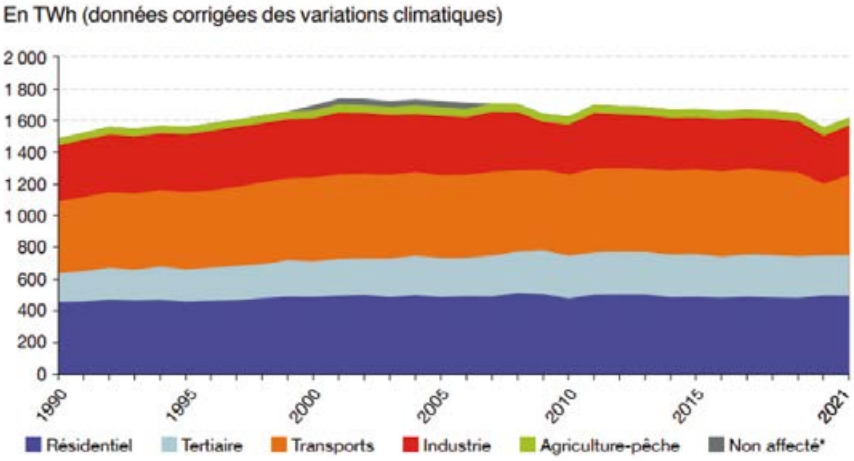
Qu'en est-il des transports ? Selon l'IFPEN, la consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports routiers s'élève actuellement à 90 EJ (25 PWh soit 2,1 Gtep). Le transport représente 31% de la consommation d'énergie finale en France, soit 1,8 EJ (500 TWh ou 43 Mtep) dont 55% soit 1 EJ (276 TWh ou 24 Mtep) imputables aux voitures particulières. Le gazole représente 78% des carburants routiers, du fait d'une omniprésence dans le secteur poids lourds et d'un parc automobile encore très diéselisé, le solde étant constitué par le sans-plomb (SP95, E10 et SP98) et l'éthanol (E85).

La densité énergétique, privilège du pétrole

Le contexte étant dressé, considérons les ACV respectives de chaque mode de propulsion. Si le moteur à combustion interne a supplanté la vapeur et l'électricité au tournant du XXe siècle, c'est grâce à un atout maître : sa prodigieuse capacité à embarquer une très grande quantité d'énergie de manière légère et compacte, qui lui confère autonomie et polyvalence.

Source de cette avantage compétitif, la remarquable densité énergétique du gazole, de l'essence, et dans une moindre mesure

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR
TOTAL : 1 618 TWH EN 2021 (DONNÉE CORRIGÉE DES VARIATIONS CLIMATIQUES)



** La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.*
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.
À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
***Source** : SDES, Bilan énergétique de la France*

de l'éthanol, respectivement de 13,5, de 12,3 et de 8,1 kWh/kg (soit de 11,2, de 9,2 et 6,3 kWh/L). L'énergie spécifique du stockage chimique de l'énergie électrique, dans des cellules de chimie NMC, NCA ou à fortiori LFP par exemple, a certes bondi depuis les batteries au plomb, mais demeure en retrait d'environ deux ordres de grandeur. Jugez plutôt : avec des valeurs de 250 Wh/kg environ au niveau des cellules, et généralement proches de 150 Wh/kg au niveau du pack, plus de 300 kg sont nécessaires pour embarquer 50 kWh d'énergie utile, soit l'équivalent énergétique de 5L d'hydrocarbures.

Corollaire de ce handicap physique lié à sa batterie, un VE réclame davantage d'énergie qu'un VT lors de sa construction, du fait de la fabrication des cellules qui implique des activités très énergivores d'extraction et de raffinage de ressources minérales. Il en découle une pénalité lors de l'étape de fabrication qui se traduit par une ordonnée à l'origine du VE bien supérieure à celle du VT.

Le rendement, joker de l'électricité

Le match est-il plié pour autant ? Rien n'est moins sûr, car le moteur électrique a plus d'un tour dans son sac. Outre la lutte contre le dérèglement climatique qui le remet au goût du jour, il peut compter sur une botte secrète : son excellent rendement ! Celui-ci dépasse fréquemment 90 % pour les véhicules électriques animés par des moteurs synchrones à aimants permanents, ou même à rotors bobinés.

Un rendement incomparable à celui des

Selon l'IFPEN, la consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports routiers s'élève actuellement à 90 EJ (25 PWh soit 2,1 Gtep).

moteurs à combustion interne, dont le cycle thermodynamique s'avère dispendieux. Le cycle de Beau de Rochas du moteur essence à allumage commandé peine à assurer un rendement réel supérieur à 35%. Même le cycle diesel, plus efficace et caractérisé par un allumage spontané par compression du carburant, dépasse difficilement 42%, le solde étant dissipé sous forme de chaleur.
En roulage réel, le rendement s'établit plutôt aux alentours de 20%, voire 15% dans les centres-villes encombrés. Et même dans ces conditions défavorables, l'électrique enfonce le clou : l'ensemble moteur et batterie, en travaillant en générateur, permet un freinage récupératif qui recharge la batterie lors des ralentissements, évitant de dissiper en chaleur la précieuse énergie cinétique.

Grâce à l'excellent rendement de sa chaîne de traction, le véhicule électrique consomme donc 3 à 4 fois moins d'énergie en roulage que son homologue thermique.

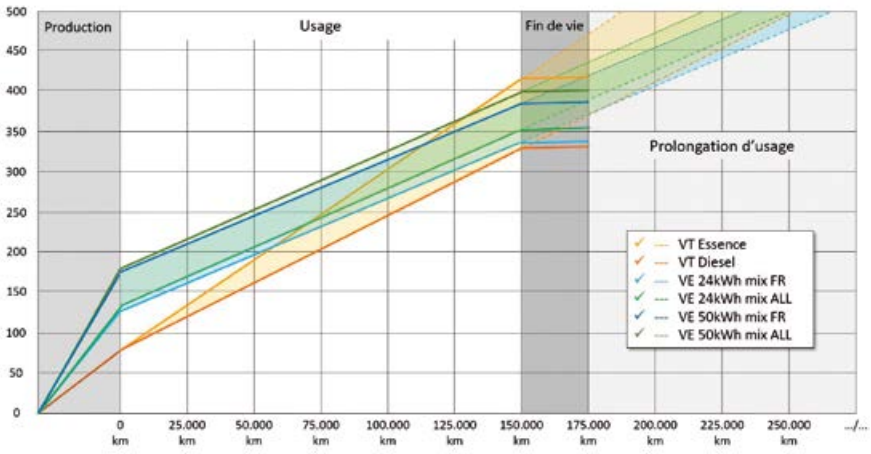
Balle au centre ?

Grâce à l'excellent rendement de sa chaîne de traction, le véhicule électrique consomme donc 3 à 4 fois moins d'énergie en roulage que son homologue thermique. Alors que des véhicules diesel, essence et éthanol consommant respectivement 5L, 6,25L et 8,3L/100km dissiperont respectivement 560, 573 et 527Wh/km, leur homologue électrique se contentera ainsi de 150Wh/km.
Toutefois, pour établir la consommation d'énergie globale d'un véhicule électrique, « du puits à la roue », la méthodologie ACV considère l'énergie primaire. Or le diagramme de Sankey est cruel : le rendement énergétique de la production électrique avec le mix et les technologies actuelles est faible. Le coefficient de conversion des centrales nucléaires est conventionnellement proche de celui des centrales thermiques, de l'ordre du tiers, comme évoqué dans le chapitre précédent. Malgré un rendement du véhicule 3 ou 4 fois supérieur, la consommation d'énergie primaire en roulage reste donc significative, de l'ordre de 3/4 de celle d'un véhicule thermique, ce qui se traduit graphiquement par une pente à peine moins inclinée.
Bien plus d'énergie mobilisée à la construction, et presque autant en roulage : la consommation énergétique d'un VE, peu sensible au mix électrique, s'avère proche de 350 GJ soit celle d'un diesel sur l'ensemble de son cycle de vie, même en envisageant une batterie de capacité modeste (24kWh). En doublant cette capacité et donc la pénalité à la production (+50GJ soit +14MWh), et en conservant la même pente, la consommation totale viendrait même à frôler celle d'un véhicule essence, proche de 400 GJ.

Bilan de consommation d'énergie primaire

Cette étude ACV met ainsi en lumière que la consommation d'énergie primaire du VE est du même ordre que celle de son homologue VT, tant en France qu'en Allemagne. Cette comparaison évoluera d'autant plus défavorablement pour le VE que sa batterie sera imposante, sous le double effet du surcroît d'énergie grise à la construction et de son appétit accru par la surcharge pondérale. À l'inverse, l'intérêt énergétique du VE sera d'autant plus marqué que celui-ci sera équipé d'une batterie modeste, qu'il circulera essentiellement en ville où son excellent rendement sera mis à profit, et qu'il sera utilisé durablement.
Si l'ACV renonçait à départager électrique et thermique à l'aune de l'efficacité énergétique, l'hydrogène ou les biocarburants modifieraient-ils cette conclusion ? Comme exposé dans un précédent dossier (Dossier #879 de 11/2022), le véhicule FCEV alimenté par une pile à combustible souffre d'une chaîne de rendements bien plus pénalisante que celle du BEV, d'un facteur 3 environ. Que l'hydrogène utilisé comme vecteur d'énergie soit issu d'hydrocarbures (reformage de méthane) ou d'une production électrique thermique ou nucléaire, le bilan ci-dessus serait donc dégradé 3 fois : juger cette solution peu attractive sur le plan énergétique relève de l'euphémisme. Les biocarburants type colza (diester) pour moteur diesel et éthanol (E85) pour moteur essence modifient peu le bilan énergétique du véhicule thermique (VT), du fait d'un rendement de combustion équivalent. Match nul donc sur le plan énergétique.

INDICATEUR DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE TOTALE (GJ)
VG D'APRÈS DIVERSES SOURCES DONT ACV ADEME



Le climat : l'épée de Damoclès

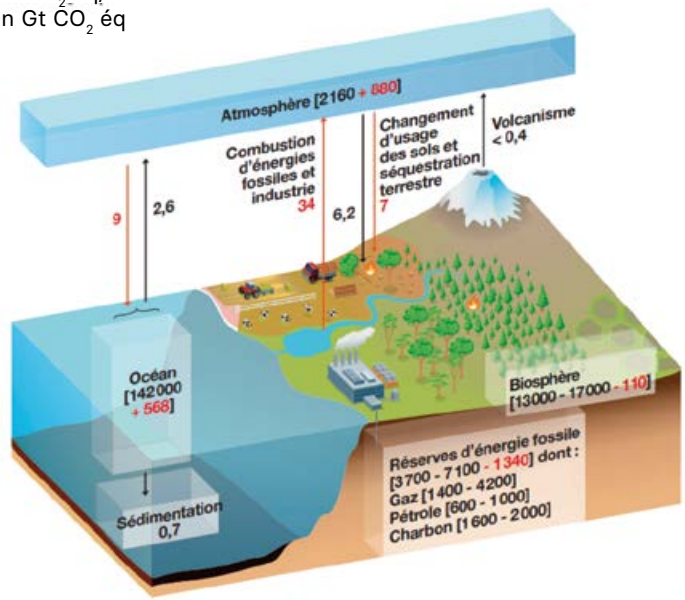
Pour entamer la seconde manche de notre ACV et évaluer le potentiel de contribution au changement climatique, un préambule sur le climat s'impose. Celui-ci est en effet affecté par la croissance exponentielle des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), CO_2 en tête. Issue de la combustion des ressources fossiles, mais également de l'élevage, ces GES, comptabilisés en "équivalent carbone" ou "équivalent CO_2", renforcent l'effet de serre naturel, ce qui conduit à l'élévation de sa température en surface, par forçage radiatif.

Pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre, le schéma suivant, issu des travaux du GIEC, illustre cette comptabilité des flux de gaz à effet de serre. L'augmentation de leur concentration atmosphérique déséquilibre le bilan énergétique terrestre et contribue au dérèglement climatique. Multipliées par 20 depuis 1900, jusqu'à dépasser 34 Gt de CO_2 (soit 10 Gt éq. carbone), ces émissions dépassent aujourd'hui d'un facteur 2 les capacités d'absorption des océans et de la biosphère. Dans le détail, si les océans absorbent 9 Gt/an éq. CO_2, et que la biosphère continentale en prélève quelques 7 Gt/an, il demeure un solde proche de 20 Gt/an qui n'est pas absorbé et contribue à augmenter fortement l'effet de serre. Imputables pour 44% au charbon, 34% au pétrole et 22% au gaz, ces émissions de CO_2 sont liées pour 25 % aux transports, juste derrière l'industrie qui en représente 37%. L'explosion impressionnante des émissions chinoises, multipliées par 3 entre 2002 et 2012, et la croissance régulière des émissions indiennes, trahissent à la fois une brutale délocalisation de pans entiers de l'industrie et des mix énergétiques particulièrement carbonés. Si la moyenne mondiale des émissions de CO_2 par habitant s'établit à 4,4t en 2019, les disparités demeurent marquées : 14,5t aux États-Unis, 7,8t en Allemagne, 7,1t en Chine, 4,4t en France, 1,7t en Inde et une moyenne de 1t en Afrique.

Comment rééquilibrer ces émissions avec les capacités d'absorption ? Voici 25 ans, le GIEC préconisait déjà une division par 2 des émissions globales. Soit une moyenne mondiale d'émission annuelle à 2t éq. CO_2 (500 kg éq. carbone) par habitant. L'objectif ? Stabiliser vers 500 ppm la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, contre 420 ppm en 2022 et 280 ppm avant l'ère industrielle, afin de contenir le réchauffement global à quelques 2 °C degrés.

RÉSERVOIRS ET FLUX DE GES : EXEMPLE DU CO_2 AU COURS DES ANNÉES 2010-2019

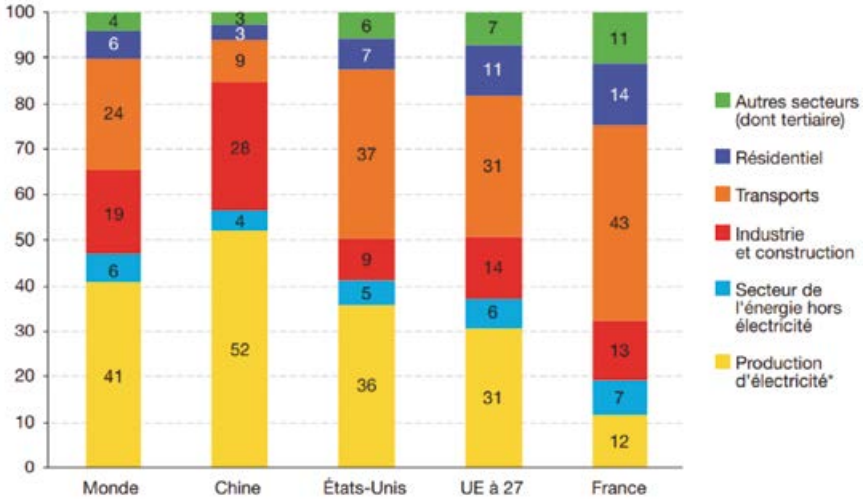
Flux en Gt CO_2 éq/an
Stocks en Gt CO_2 éq



Note : ce graphique présente : (i) entre crochets, la taille des réservoirs aux temps préindustriels en milliards de tonnes de CO_2 en noir et leur variation sur la période 1750-2011 en rouge ; (ii) sous forme de flèches, les flux de carbone entre les réservoirs en milliards de tonnes d'équivalent CO_2 par an (voir glossaire). Les flux préindustriels sont en noir. Ceux qui sont liés aux activités anthropiques entre 2010 et 2019 sont en rouge.
***Sources :** d'après Giec, 1er groupe de travail, 2013 et The Global Carbon Project, Global Carbon Budget, 2020*

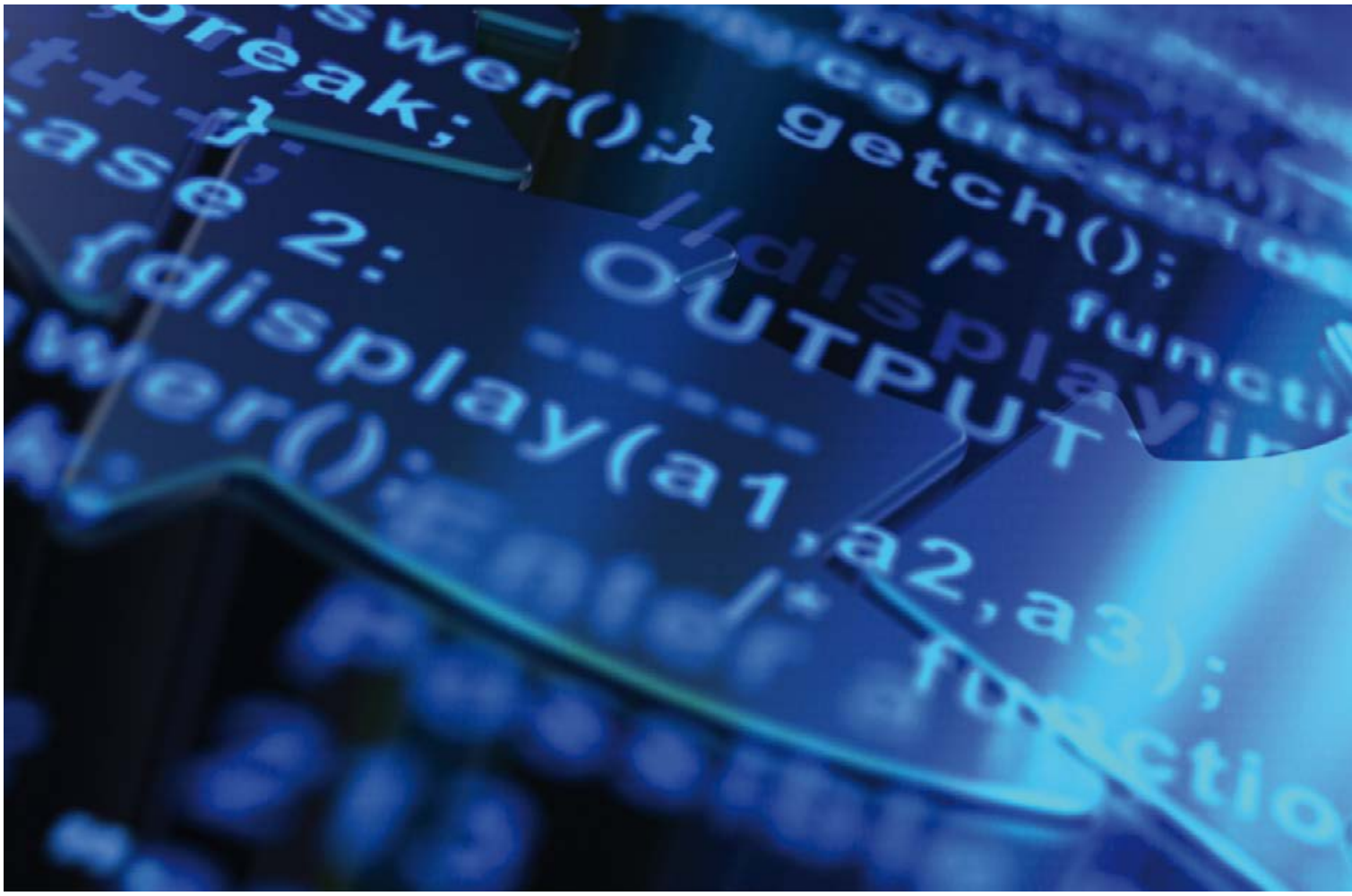
ORIGINE DES ÉMISSIONS DE CO_2 DUES À LA COMBUSTION D'ENERGIE EN 2019

En %



** Y compris cogénération et autoproduction.*
***Source :** AIE, 2021*

Historiquement plus contributeurs aux émissions, les pays industrialisés se sont quant à eux engagés à réduire leurs propres émissions d'un facteur 4 d'ici 2050. Vaste programme, qui suppose de réduire les émissions de 75%, et qui explique l'attrait de la Commission européenne pour la mobilité électrique ! Un objectif qui implique un sevrage des énergies fossiles. De fait, le transport constitue un levier important. Représentant près du



quart (24%) des émissions mondiales de CO_2, les transports constituent presque le tiers (31%) des émissions européennes, et même 43% pour l'Hexagone. C'est dire si les attentes vis-à-vis de la mobilité décarbonée sont élevées.

Potentiel changement climatique

Cette seconde manche de notre ACV s'annonce donc a priori plus favorable au VE. En effet, alors que le moteur à combustion interne est étrillé pour son goût pour les hydrocarbures, dont il rejette après combustion non seulement des polluants (NOx, HC, particules…) mais aussi des GES (dont CO_2), le moteur électrique est parfois présenté comme « sans émissions ».

Vierge d'émissions, vraiment ? Cette réduction des émissions de gaz à effet de serre, particulièrement recherchée à l'heure de réduire la contribution de l'automobile au réchauffement climatique, doit être nuancée pour deux raisons. Il faut en effet considérer, d'une part, l'empreinte carbone de la fabrication du véhicule et de sa batterie, d'autre part, l'impact carbone de l'électricité utilisée !

La fabrication de la batterie : éternel talon d'Achille !

Le premier levier pour réduire le potentiel de changement climatique du VE est de limiter son handicap initial. En effet, les phases de fabrication du véhicule électrique contribuent davantage à l'effet de serre que celles de son homologue thermique. Sans surprise, la batterie est une nouvelle fois en cause. Même en partant du postulat d'une modeste batterie de 24kWh, celle-ci double l'impact de la fabrication et donc l'ordonnée à l'origine, avec près de 4t CO_2eq supplémentaires. La capacité des batteries montées sur le segment B avoisinant aujourd'hui 50 kWh, le potentiel d'émissions bondirait logiquement à 10t avant même le premier kilomètre.

Pire encore, l'hypothèse exprimée par l'ADEME d'une fabrication française des cellules semble bien peu en rapport avec la réalité du marché, tant le monopole des fabricants asiatiques, à l'énergie particulièrement carbonée, est aujourd'hui une évidence. Autant dire qu'une ordonnée à l'origine proche de 12 ou 15t CO_2eq semble plus proche de la réalité pour un

tôt d'une juxtaposition. Même la part des renouvelables stagne depuis 1990 (15% à 16,3%), le recul de la biomasse compensant la progression des autres EnR.

Coup de projecteur sur l'Hexagone

Qu'en est-il de la France ? Après une croissance continue jusqu'à 2005, la consommation d'énergie primaire de la France se tasse depuis une quinzaine d'année et évolue autour de 10 EJ (2,8 PWh ou 240 Mtep), soit 1,7% de la consommation mondiale, à mettre en perspective avec une consommation d'énergie finale de 5,8 EJ (1,6 PWh soit 140 Mtep). Une fois encore, les énergies fossiles dominent, avec plus de 46% du total, distribués entre le pétrole qui certes se contracte légèrement (28%), le gaz naturel qui se maintient (16%) et plus marginalement le charbon (3%). Notons que la part significative du nucléaire dans l'énergie primaire (4,1 EJ 1,2 PWh en 2021 soit 40%) est liée au mode de décompte, 2/3 de cette énergie primaire (uranium) étant dissipée sous forme de chaleur lors de la conversion en énergie électrique finale. La contribution de l'atome aux 532 TWh électriques d'énergie finale produits en 2021 s'établit ainsi à 361 TWh.

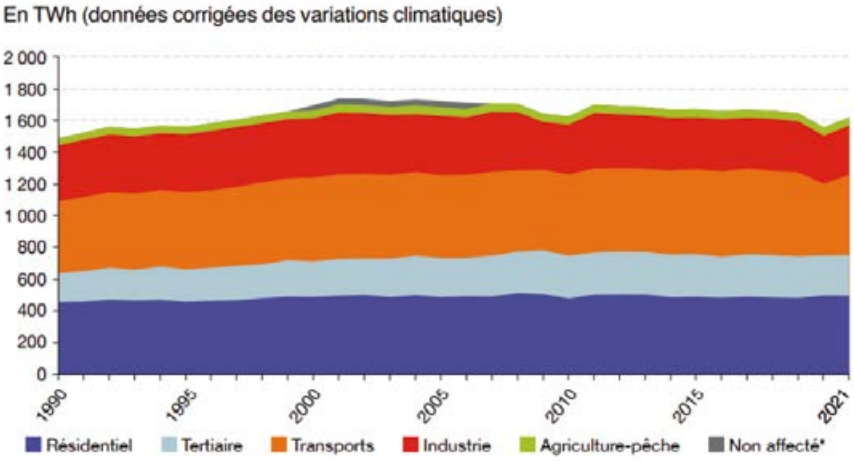
Qu'en est-il des transports ? Selon l'IFPEN, la consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports routiers s'élève actuellement à 90 EJ (25 PWh soit 2,1 Gtep). Le transport représente 31% de la consommation d'énergie finale en France, soit 1,8 EJ (500 TWh ou 43 Mtep) dont 55% soit 1 EJ (276 TWh ou 24 Mtep) imputables aux voitures particulières. Le gazole représente 78% des carburants routiers, du fait d'une omniprésence dans le secteur poids lourds et d'un parc automobile encore très diéselisé, le solde étant constitué par le sans-plomb (SP95, E10 et SP98) et l'éthanol (E85).

La densité énergétique, privilège du pétrole

Le contexte étant dressé, considérons les ACV respectives de chaque mode de propulsion. Si le moteur à combustion interne a supplanté la vapeur et l'électricité au tournant du XXe siècle, c'est grâce à un atout maître : sa prodigieuse capacité à embarquer une très grande quantité d'énergie de manière légère et compacte, qui lui confère autonomie et polyvalence.

Source de cette avantage compétitif, la remarquable densité énergétique du gazole, de l'essence, et dans une moindre mesure

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR
TOTAL : 1 618 TWH EN 2021 (DONNÉE CORRIGÉE DES VARIATIONS CLIMATIQUES)



** La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.*
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.
À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
***Source** : SDES, Bilan énergétique de la France*

de l'éthanol, respectivement de 13,5, de 12,3 et de 8,1 kWh/kg (soit de 11,2, de 9,2 et 6,3 kWh/L). L'énergie spécifique du stockage chimique de l'énergie électrique, dans des cellules de chimie NMC, NCA ou à fortiori LFP par exemple, a certes bondi depuis les batteries au plomb, mais demeure en retrait d'environ deux ordres de grandeur. Jugez plutôt : avec des valeurs de 250 Wh/kg environ au niveau des cellules, et généralement proches de 150 Wh/kg au niveau du pack, plus de 300 kg sont nécessaires pour embarquer 50 kWh d'énergie utile, soit l'équivalent énergétique de 5L d'hydrocarbures.

Corollaire de ce handicap physique lié à sa batterie, un VE réclame davantage d'énergie qu'un VT lors de sa construction, du fait de la fabrication des cellules qui implique des activités très énergivores d'extraction et de raffinage de ressources minérales. Il en découle une pénalité lors de l'étape de fabrication qui se traduit par une ordonnée à l'origine du VE bien supérieure à celle du VT.

Le rendement, joker de l'électricité

Le match est-il plié pour autant ? Rien n'est moins sûr, car le moteur électrique a plus d'un tour dans son sac. Outre la lutte contre le dérèglement climatique qui le remet au goût du jour, il peut compter sur une botte secrète : son excellent rendement ! Celui-ci dépasse fréquemment 90 % pour les véhicules électriques animés par des moteurs synchrones à aimants permanents, ou même à rotors bobinés.

Un rendement incomparable à celui des

Selon l'IFPEN, la consommation mondiale d'énergie dans le secteur des transports routiers s'élève actuellement à 90 EJ (25 PWh soit 2,1 Gtep).

moteurs à combustion interne, dont le cycle thermodynamique s'avère dispendieux. Le cycle de Beau de Rochas du moteur essence à allumage commandé peine à assurer un rendement réel supérieur à 35%. Même le cycle diesel, plus efficace et caractérisé par un allumage spontané par compression du carburant, dépasse difficilement 42%, le solde étant dissipé sous forme de chaleur.
En roulage réel, le rendement s'établit plutôt aux alentours de 20%, voire 15% dans les centres-villes encombrés. Et même dans ces conditions défavorables, l'électrique enfonce le clou : l'ensemble moteur et batterie, en travaillant en générateur, permet un freinage récupératif qui recharge la batterie lors des ralentissements, évitant de dissiper en chaleur la précieuse énergie cinétique.

Grâce à l'excellent rendement de sa chaîne de traction, le véhicule électrique consomme donc 3 à 4 fois moins d'énergie en roulage que son homologue thermique.

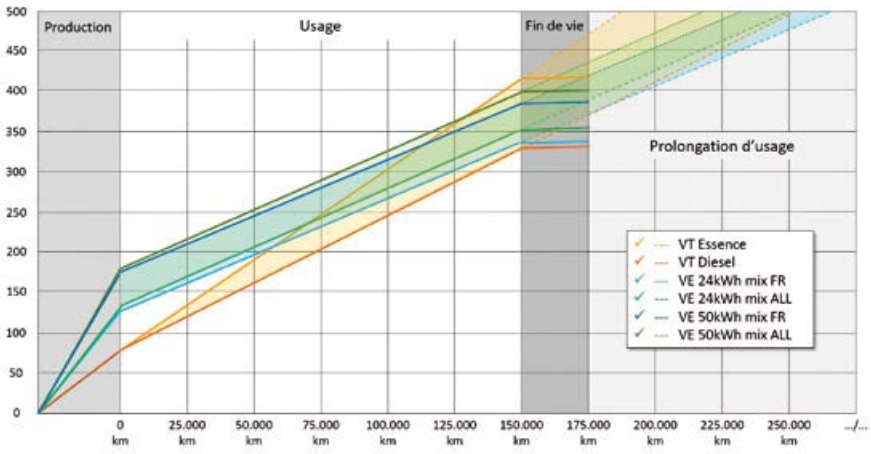
Balle au centre ?

Grâce à l'excellent rendement de sa chaîne de traction, le véhicule électrique consomme donc 3 à 4 fois moins d'énergie en roulage que son homologue thermique. Alors que des véhicules diesel, essence et éthanol consommant respectivement 5L, 6,25L et 8,3L/100km dissiperont respectivement 560, 573 et 527Wh/km, leur homologue électrique se contentera ainsi de 150Wh/km.
Toutefois, pour établir la consommation d'énergie globale d'un véhicule électrique, « du puits à la roue », la méthodologie ACV considère l'énergie primaire. Or le diagramme de Sankey est cruel : le rendement énergétique de la production électrique avec le mix et les technologies actuelles est faible. Le coefficient de conversion des centrales nucléaires est conventionnellement proche de celui des centrales thermiques, de l'ordre du tiers, comme évoqué dans le chapitre précédent. Malgré un rendement du véhicule 3 ou 4 fois supérieur, la consommation d'énergie primaire en roulage reste donc significative, de l'ordre de 3/4 de celle d'un véhicule thermique, ce qui se traduit graphiquement par une pente à peine moins inclinée.
Bien plus d'énergie mobilisée à la construction, et presque autant en roulage : la consommation énergétique d'un VE, peu sensible au mix électrique, s'avère proche de 350 GJ soit celle d'un diesel sur l'ensemble de son cycle de vie, même en envisageant une batterie de capacité modeste (24kWh). En doublant cette capacité et donc la pénalité à la production (+50GJ soit +14MWh), et en conservant la même pente, la consommation totale viendrait même à frôler celle d'un véhicule essence, proche de 400 GJ.

Bilan de consommation d'énergie primaire

Cette étude ACV met ainsi en lumière que la consommation d'énergie primaire du VE est du même ordre que celle de son homologue VT, tant en France qu'en Allemagne. Cette comparaison évoluera d'autant plus défavorablement pour le VE que sa batterie sera imposante, sous le double effet du surcroît d'énergie grise à la construction et de son appétit accru par la surcharge pondérale. À l'inverse, l'intérêt énergétique du VE sera d'autant plus marqué que celui-ci sera équipé d'une batterie modeste, qu'il circulera essentiellement en ville où son excellent rendement sera mis à profit, et qu'il sera utilisé durablement.
Si l'ACV renonçait à départager électrique et thermique à l'aune de l'efficacité énergétique, l'hydrogène ou les biocarburants modifieraient-ils cette conclusion ? Comme exposé dans un précédent dossier (Dossier #879 de 11/2022), le véhicule FCEV alimenté par une pile à combustible souffre d'une chaîne de rendements bien plus pénalisante que celle du BEV, d'un facteur 3 environ. Que l'hydrogène utilisé comme vecteur d'énergie soit issu d'hydrocarbures (reformage de méthane) ou d'une production électrique thermique ou nucléaire, le bilan ci-dessus serait donc dégradé 3 fois : juger cette solution peu attractive sur le plan énergétique relève de l'euphémisme. Les biocarburants type colza (diester) pour moteur diesel et éthanol (E85) pour moteur essence modifient peu le bilan énergétique du véhicule thermique (VT), du fait d'un rendement de combustion équivalent. Match nul donc sur le plan énergétique.

INDICATEUR DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE TOTALE (GJ)
VG D'APRÈS DIVERSES SOURCES DONT ACV ADEME



Le climat : l'épée de Damoclès

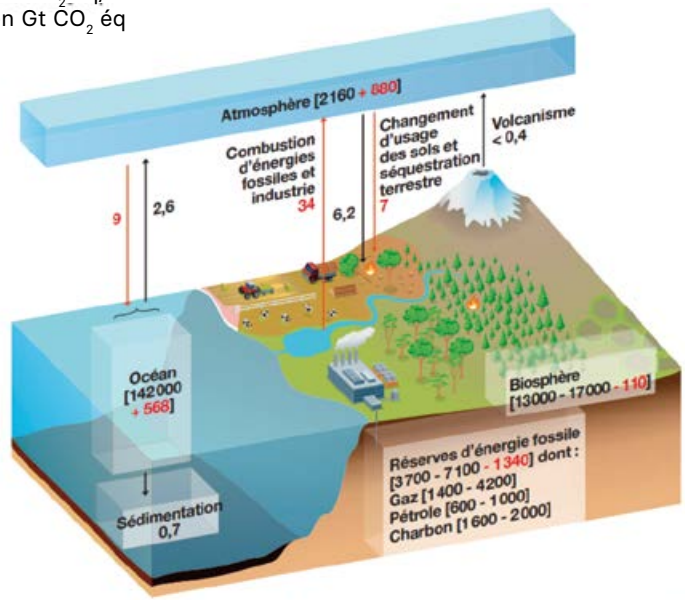
Pour entamer la seconde manche de notre ACV et évaluer le potentiel de contribution au changement climatique, un préambule sur le climat s'impose. Celui-ci est en effet affecté par la croissance exponentielle des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), CO_2 en tête. Issue de la combustion des ressources fossiles, mais également de l'élevage, ces GES, comptabilisés en "équivalent carbone" ou "équivalent CO_2", renforcent l'effet de serre naturel, ce qui conduit à l'élévation de sa température en surface, par forçage radiatif.

Pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre, le schéma suivant, issu des travaux du GIEC, illustre cette comptabilité des flux de gaz à effet de serre. L'augmentation de leur concentration atmosphérique déséquilibre le bilan énergétique terrestre et contribue au dérèglement climatique. Multipliées par 20 depuis 1900, jusqu'à dépasser 34 Gt de CO_2 (soit 10 Gt éq. carbone), ces émissions dépassent aujourd'hui d'un facteur 2 les capacités d'absorption des océans et de la biosphère. Dans le détail, si les océans absorbent 9 Gt/an éq. CO_2, et que la biosphère continentale en prélève quelques 7 Gt/an, il demeure un solde proche de 20 Gt/an qui n'est pas absorbé et contribue à augmenter fortement l'effet de serre. Imputables pour 44% au charbon, 34% au pétrole et 22% au gaz, ces émissions de CO_2 sont liées pour 25 % aux transports, juste derrière l'industrie qui en représente 37%. L'explosion impressionnante des émissions chinoises, multipliées par 3 entre 2002 et 2012, et la croissance régulière des émissions indiennes, trahissent à la fois une brutale délocalisation de pans entiers de l'industrie et des mix énergétiques particulièrement carbonés. Si la moyenne mondiale des émissions de CO_2 par habitant s'établit à 4,4t en 2019, les disparités demeurent marquées : 14,5t aux États-Unis, 7,8t en Allemagne, 7,1t en Chine, 4,4t en France, 1,7t en Inde et une moyenne de 1t en Afrique.

Comment rééquilibrer ces émissions avec les capacités d'absorption ? Voici 25 ans, le GIEC préconisait déjà une division par 2 des émissions globales. Soit une moyenne mondiale d'émission annuelle à 2t éq. CO_2 (500 kg éq. carbone) par habitant. L'objectif ? Stabiliser vers 500 ppm la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, contre 420 ppm en 2022 et 280 ppm avant l'ère industrielle, afin de contenir le réchauffement global à quelques 2 °C degrés.

RÉSERVOIRS ET FLUX DE GES : EXEMPLE DU CO_2 AU COURS DES ANNÉES 2010-2019

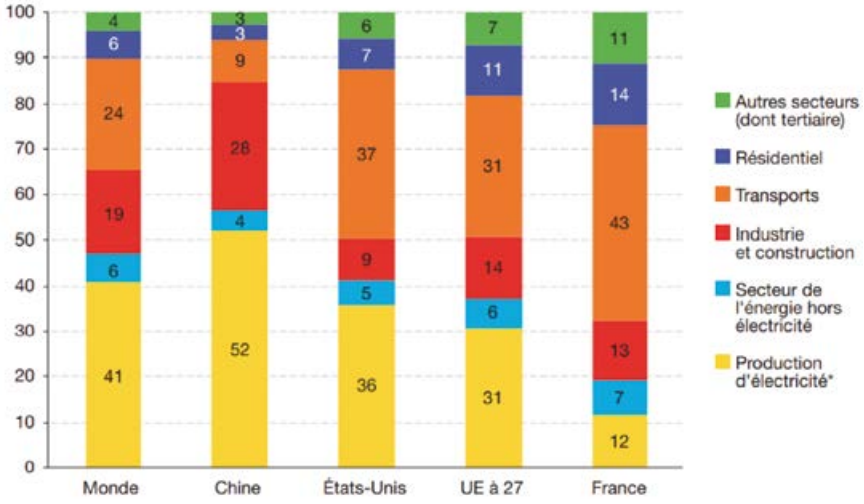
Flux en Gt CO_2 éq/an
Stocks en Gt CO_2 éq



Note : ce graphique présente : (i) entre crochets, la taille des réservoirs aux temps préindustriels en milliards de tonnes de CO_2 en noir et leur variation sur la période 1750-2011 en rouge ; (ii) sous forme de flèches, les flux de carbone entre les réservoirs en milliards de tonnes d'équivalent CO_2 par an (voir glossaire). Les flux préindustriels sont en noir. Ceux qui sont liés aux activités anthropiques entre 2010 et 2019 sont en rouge.
***Sources :** d'après Giec, 1er groupe de travail, 2013 et The Global Carbon Project, Global Carbon Budget, 2020*

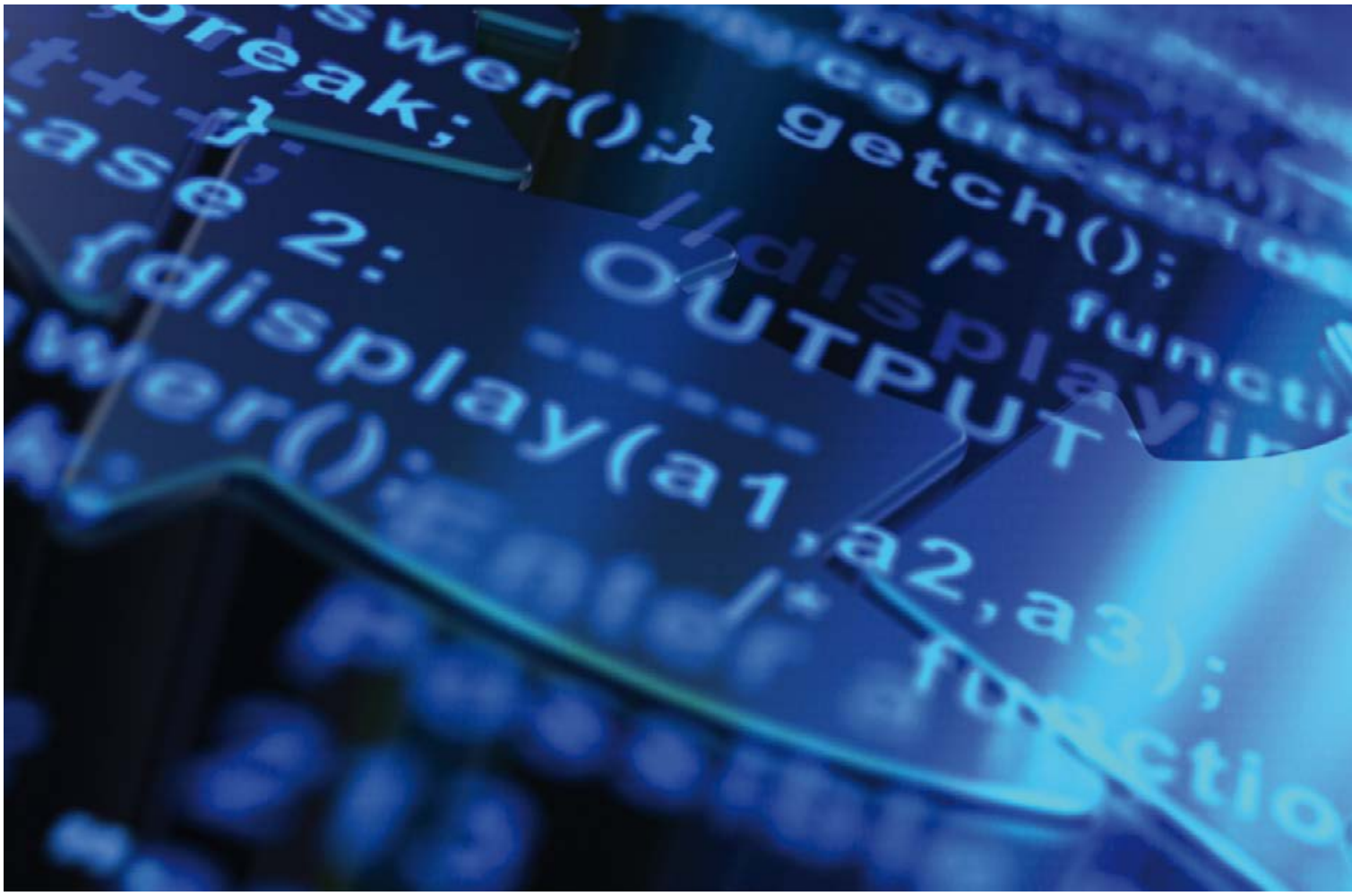
ORIGINE DES ÉMISSIONS DE CO_2 DUES À LA COMBUSTION D'ENERGIE EN 2019

En %



** Y compris cogénération et autoproduction.*
***Source :** AIE, 2021*

Historiquement plus contributeurs aux émissions, les pays industrialisés se sont quant à eux engagés à réduire leurs propres émissions d'un facteur 4 d'ici 2050. Vaste programme, qui suppose de réduire les émissions de 75%, et qui explique l'attrait de la Commission européenne pour la mobilité électrique ! Un objectif qui implique un sevrage des énergies fossiles. De fait, le transport constitue un levier important. Représentant près du



quart (24%) des émissions mondiales de CO_2, les transports constituent presque le tiers (31%) des émissions européennes, et même 43% pour l'Hexagone. C'est dire si les attentes vis-à-vis de la mobilité décarbonée sont élevées.

Potentiel changement climatique

Cette seconde manche de notre ACV s'annonce donc a priori plus favorable au VE. En effet, alors que le moteur à combustion interne est étrillé pour son goût pour les hydrocarbures, dont il rejette après combustion non seulement des polluants (NOx, HC, particules…) mais aussi des GES (dont CO_2), le moteur électrique est parfois présenté comme « sans émissions ».

Vierge d'émissions, vraiment ? Cette réduction des émissions de gaz à effet de serre, particulièrement recherchée à l'heure de réduire la contribution de l'automobile au réchauffement climatique, doit être nuancée pour deux raisons. Il faut en effet considérer, d'une part, l'empreinte carbone de la fabrication du véhicule et de sa batterie, d'autre part, l'impact carbone de l'électricité utilisée !

La fabrication de la batterie : éternel talon d'Achille !

Le premier levier pour réduire le potentiel de changement climatique du VE est de limiter son handicap initial. En effet, les phases de fabrication du véhicule électrique contribuent davantage à l'effet de serre que celles de son homologue thermique. Sans surprise, la batterie est une nouvelle fois en cause. Même en partant du postulat d'une modeste batterie de 24kWh, celle-ci double l'impact de la fabrication et donc l'ordonnée à l'origine, avec près de 4t CO_2eq supplémentaires. La capacité des batteries montées sur le segment B avoisinant aujourd'hui 50 kWh, le potentiel d'émissions bondirait logiquement à 10t avant même le premier kilomètre.

Pire encore, l'hypothèse exprimée par l'ADEME d'une fabrication française des cellules semble bien peu en rapport avec la réalité du marché, tant le monopole des fabricants asiatiques, à l'énergie particulièrement carbonée, est aujourd'hui une évidence. Autant dire qu'une ordonnée à l'origine proche de 12 ou 15t CO_2eq semble plus proche de la réalité pour un

véhicule du segment B représentatif du marché actuel, et qu'un SUV affublé d'une grosse batterie de 80 ou 100kWh dépassera assez facilement 25t CO_2eq avant le premier tour de roue. Un handicap dur à compenser !

Le bouquet énergétique, clef de voûte de l'impact climatique !

Pour se rattraper, le VE compte sur des émissions réduites en phase d'usage. Toutefois, ce levier n'est pas du ressort des constructeurs automobiles, mais dépend du bouquet ou mix électrique. En phase de roulage, le mode de production de l'électricité devient en effet prépondérant, ce qui offre des perspectives très diverses en fonction des zones géographiques et des bouquets électriques associés, dont le contenu carbone fluctue entre 0 et 900g/kWh, ainsi que l'illustre la carte ci-dessous. Pour mieux comprendre cet état de fait, il faut se pencher sur la production d'électricité, assurée depuis la fin du XIX^{e} siècle par des centrales électriques qui transforment des énergies primaires, via des générateurs électriques alimentés en combustible fossile (charbon, gaz ou pétrole) ou en combustible organique (biomasse, déchets), en énergie nucléaire, hydroélectrique, éolienne ou solaire.

Mix électrique : enjeux et perspectives

Représentant 20% de la consommation mondiale d'énergie finale, l'électricité s'appuie encore majoritairement (61%) sur des sources fossiles (charbon et gaz essentiellement). Le solde est issu du nucléaire pour 10% et des énergies renouvelables pour 28% (hydroélectricité 17%, éolien 6%, solaire 3%, biomasse 2%, géothermie 0,4%). La Chine (29%) et les États-Unis (16%) totalisent 45% de la production mondiale. Les intensités carbone correspondantes sont très disparates : 820g/kWh en moyenne pour les centrales à charbon (voire 1 150g/kWh pour le lignite), 490g/kWh pour le gaz, mais moins de 50g/kWh pour le photovoltaique, voire moins de 25g/kWh pour l'hydraulique, le nucléaire, et l'éolien.

Du fait de cette disparité, il est paradoxalement aisé de déterminer un seuil à partir duquel le VE émettra davantage de

chaîne de transformations au rendement particulièrement médiocre, et requiert au moins 3 fois plus d'énergie que la solution à batterie équivalente, ce qui grève d'autant l'intensité carbone du mix initial. Le principal intérêt de ce vecteur énergétique en termes de décarbonation serait donc sa capacité à stocker l'électricité perdue issue de sources intermittentes (éolien et solaire), afin de permettre leur pilotage et de favoriser leur croissance dans le mix. L'intensité décarbonante de l'hydrogène, exprimée en tCO_2e / tH2, étant fort disparate selon les usages, la dernière étude de Carbone 4 recommande d'ailleurs de prioriser les usages industriels comme la réduction du minerai de fer dans les aciéries, la production d'ammoniac ou de méthanol, voire dans une moindre mesure la mobilité maritime, ferroviaire ou aérienne.

Épuisement des ressources fossiles, l'épée de Damoclès du peak-oil

Si le fossile domine, les lois physiques sont têtues : une ressource limitée et non renouvelable aux échelles de temps humaines a vocation à s'épuiser. Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile étaient estimées à 40 517 EJ en 2020, selon l'Agence fédérale allemande, dont 55% de charbon, 25% de pétrole et 19% de gaz naturel. De quoi assurer en apparence quelques décennies de production au rythme actuel : 56 ans pour le pétrole, 54 ans pour le gaz naturel, 139 ans pour le charbon. Pour autant, l'effritement du taux de retour énergétique (EROI), qui mesure la difficulté à extraire les hydrocarbures, témoigne de l'imminence du fameux peak-oil, maintes fois annoncé et repoussé par l'évolution des techniques et l'exploitation du pétrole de roche mère (gaz/pétrole de schiste).

Un constat qui vaut également pour les ressources minérales. Avec les techniques actuelles, les réserves d'uranium pourraient durer 90 à 130 ans, voire davantage en usant de surgénération ou, à terme, de fusion nucléaire. Le potentiel exploitable de l'énergie solaire est quant à lui estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle, mais photovoltaïque comme éolien reposent eux-mêmes sur l'usage de minerais en cours d'épuisement. La quadrature du cercle…

Sans surprise, le VT, qui consomme des hydrocarbures sur l'ensemble de son cycle de vie, voit sa contribution à l'épuisement des ressources fossiles s'accroître de manière linéaire au fur et au mesure de son utilisation. Le VE quant à lui, friand de ressources fossiles à la fabrication, peut compenser ce retard si sa batterie est modeste et se recharge en électricité d'origine non fossile. Logiquement, la comparaison des ACV vis-à-vis de l'épuisement des ressources fossiles apparaît donc presque calquée sur celle des GES. Tempérons toutefois cette conclusion en objectant que le minerai d'uranium, non intégré à l'équation puisque de nature non fossile, n'en constitue pas moins une ressource limitée dont la déplétion doit être prise en compte.

Potentiel d'épuisement des ressources minérales

Un autre risque majeur, tant environnemental que stratégique, tient donc à la consommation accrue de matières premières et minerais stratégiques, dont certains sont jugés critiques. Médiatisé il y a 5 ans par Guillaume Pitron (La guerre des métaux rares), ce sujet a longtemps constitué un angle mort de l'ACV. Récemment abordé avec précision dans nos colonnes (Dossier #878 de 07/2022), ce sujet préoccupe enfin le gouvernement, qui a récemment confié à Philippe Varin l'analyse de la sécurisation de l'approvisionnement industriel.

Dans ce domaine, le VE présente un impact largement plus préoccupant que celui du VT. En effet, si ce dernier requiert des catalyseurs réputés gourmands en platinoïdes rares (platine, palladium, rhodium), dont le cours dépasse parfois celui de l'or et dont les imminentes normes Euro 7 ne seront pas de nature à modérer l'usage, les quantités associées demeurent en réalité assez anecdotiques (2 à 10g).

chaîne de transformations au rendement particulièrement médiocre, et requiert au moins 3 fois plus d'énergie que la solution à batterie équivalente, ce qui grève d'autant l'intensité carbone du mix initial. Le principal intérêt de ce vecteur énergétique en termes de décarbonation serait donc sa capacité à stocker l'électricité perdue issue de sources intermittentes (éolien et solaire), afin de permettre leur pilotage et de favoriser leur croissance dans le mix. L'intensité décarbonante de l'hydrogène, exprimée en tCO_2e / tH2, étant fort disparate selon les usages, la dernière étude de Carbone 4 recommande d'ailleurs de prioriser les usages industriels comme la réduction du minerai de fer dans les aciéries, la production d'ammoniac ou de méthanol, voire dans une moindre mesure la mobilité maritime, ferroviaire ou aérienne.

Épuisement des ressources fossiles, l'épée de Damoclès du peak-oil

Si le fossile domine, les lois physiques sont têtues : une ressource limitée et non renouvelable aux échelles de temps humaines a vocation à s'épuiser. Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile étaient estimées à 40 517 EJ en 2020, selon l'Agence fédérale allemande, dont 55% de charbon, 25% de pétrole et 19% de gaz naturel. De quoi assurer en apparence quelques décennies de production au rythme actuel : 56 ans pour le pétrole, 54 ans pour le gaz naturel, 139 ans pour le charbon. Pour autant, l'effritement du taux de retour énergétique (EROI), qui mesure la difficulté à extraire les hydrocarbures, témoigne de l'imminence du fameux peak-oil, maintes fois annoncé et repoussé par l'évolution des techniques et l'exploitation du pétrole de roche mère (gaz/pétrole de schiste).

Un constat qui vaut également pour les ressources minérales. Avec les techniques actuelles, les réserves d'uranium pourraient durer 90 à 130 ans, voire davantage en usant de surgénération ou, à terme, de fusion nucléaire. Le potentiel exploitable de l'énergie solaire est quant à lui estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle, mais photovoltaïque comme éolien reposent eux-mêmes sur l'usage de minerais en cours d'épuisement. La quadrature du cercle…

Sans surprise, le VT, qui consomme des hydrocarbures sur l'ensemble de son cycle de vie, voit sa contribution à l'épuisement des ressources fossiles s'accroître de manière linéaire au fur et au mesure de son utilisation. Le VE quant à lui, friand de ressources fossiles à la fabrication, peut compenser ce retard si sa batterie est modeste et se recharge en électricité d'origine non fossile. Logiquement, la comparaison des ACV vis-à-vis de l'épuisement des ressources fossiles apparaît donc presque calquée sur celle des GES. Tempérons toutefois cette conclusion en objectant que le minerai d'uranium, non intégré à l'équation puisque de nature non fossile, n'en constitue pas moins une ressource limitée dont la déplétion doit être prise en compte.

Potentiel d'épuisement des ressources minérales

Un autre risque majeur, tant environnemental que stratégique, tient donc à la consommation accrue de matières premières et minerais stratégiques, dont certains sont jugés critiques. Médiatisé il y a 5 ans par Guillaume Pitron (La guerre des métaux rares), ce sujet a longtemps constitué un angle mort de l'ACV. Récemment abordé avec précision dans nos colonnes (Dossier #878 de 07/2022), ce sujet préoccupe enfin le gouvernement, qui a récemment confié à Philippe Varin l'analyse de la sécurisation de l'approvisionnement industriel.

Dans ce domaine, le VE présente un impact largement plus préoccupant que celui du VT. En effet, si ce dernier requiert des catalyseurs réputés gourmands en platinoïdes rares (platine, palladium, rhodium), dont le cours dépasse parfois celui de l'or et dont les imminentes normes Euro 7 ne seront pas de nature à modérer l'usage, les quantités associées demeurent en réalité assez anecdotiques (2 à 10g).

Des moteurs souvent friands de terres rares

Les lumières sont donc cette fois braquées sur les VE, friands de nombreuses ressources minérales, tant dans la confection des moteurs que des batteries. La plupart des moteurs synchrones à destination automobile nécessitent ainsi des aimants permanents puissants, qui utilisent les fameuses « terres rares » aujourd'hui fort médiatisées comme le néodyme, le dysprosium ou encore le terbium. Davantage que leur rareté supposée, c'est bien leur faible concentration qui rend leur exploitation énergivore, polluante, et si peu attractive que la Chine en détient en pratique le monopole (95%).

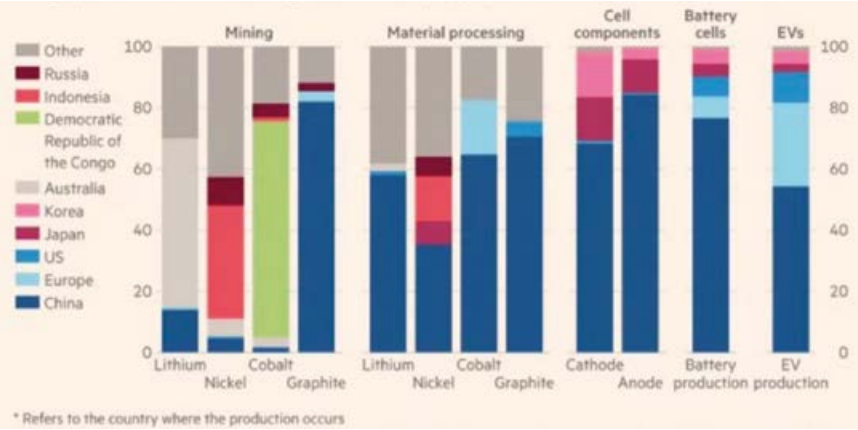
Sans recourir à la substitution d'une partie du néodyme par du lanthane ou du cérium, explorée par Toyota, certains constructeurs sont parvenus à se passer d'aimant en optant pour des moteurs synchrones à rotors bobinés. C'est notamment le cas de Renault sur la Zoe ou plus récemment de Tesla sur le moteur avant des versions intégrales. Plus encombrante et plus lourde, cette solution générant le champ magnétique via une bobine requiert en revanche un onduleur et davantage de cuivre, métal assez abondant et aisé à recycler mais de plus en plus demandé.

Des batteries très lourdes et gourmandes en ressources

De son côté, la batterie Lithium-ion, qui s'est généralisée depuis une décennie dans les châssis des véhicules électriques, réclame environ 2% en masse de lithium, soit quelques 7kg sur un véhicule de gamme intermédiaire de type Renault Zoe (50kWh) ou VW ID3 (58kWh). Un métal alcalin, principal composant de l'électrolyte, qui représente déjà 10% du coût des batteries et dont les cours s'envolent en raison de l'explosion de la demande, laquelle devrait être multipliée par 35 d'ici 2050. Cinquante nouvelles mines sont programmées, pour certaines en France, laissant augurer de l'impact d'une exploitation nécessitant de grandes quantités d'eau et parfois d'adjuvants chimiques.

Les batteries les plus répandues sur le marché, à savoir l'omniprésente NMC (Nickel, Manganèse, Cobalt) et dans une moindre mesure la chimie NCA (Nickel, Cobalt, Aluminium), utilisée notamment par Tesla, réclament également du nickel et du cobalt dans leur cathode. Si le premier est relativement abondant, 70% des quantités étant encore destinées à la fabrication d'aciers inoxydables, le second est régulièrement sous le feu des projecteurs du fait de ses conditions d'extraction, très discutables sur le plan social et environnemental.

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE GLOBAL EV BATTERY SUPPLY CHAIN (%)



Nouvelles chimies : entre parcimonie et substitution

Pour réduire cette dépendance au cobalt, qui représente autour de 4% de la masse de la batterie (entre 11 et 18kg environ), les chimistes en réduisent la proportion en substituant aux NMC 111 des chimies NMC 622 voir NMC811, parvenant parfois à limiter à 10% la proportion de ce métal. Tesla suit la même feuille de route en peaufinant des cellules de chimie NCA 811.

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse. Si leur moindre densité énergétique (-22% environ) les cantonne souvent à l'entrée de gamme, leur coût plus modéré et leur chimie exempte de cobalt et de nickel devraient leur octroyer un rôle de plus en plus central.

Plus sûres car plus stables chimiquement et moins sensible à l'emballement thermique, plus endurantes et durables car supportant davantage de cycles de charge et de décharge, elles pourraient se généraliser à court terme sur le segment B, voire les segments intermédiaires. Tesla utilise déjà des batteries LFP sans cobalt fournies par CATL et BYD sur l'entrée de gamme des Model 3 et Y, et le Losange a également fait le choix du LFP pour la future R5 électrique construite sur la plateforme CMF-B EV.

La mise en place d'une véritable économie circulaire, alimentée par des filières de recyclage plus structurées, constitue sans conteste le meilleur levier pour amé-

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse.

liorer le bilan ACV du VE, tout en réduisant la dépendance géopolitique associée à la mobilité.

L'acidification atmosphérique

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des « pluies acides ». À la clef, une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation. Parmi les substances participant à ce phénomène figurent entre autres les SO_2, NOx, NH_3, HCl, HF.
Pour les VT, ce potentiel d'acidification est essentiellement lié aux émissions des raffineries (SO_2 et NOx), voire aux émissions de NOx en roulage, principalement du diesel. Toutefois, les scénarii modélisés, en France comme en Allemagne, mettent en évidence une contribution accrue du VE de 24 kWh sur cet indicateur, quel que soit le kilométrage parcouru.
À l'origine de cette flambée, figurent la production d'électricité et surtout la fabrication de la batterie. Les émissions de SO_2 pendant la phase d'extraction des métaux nécessaires à l'élaboration de la batterie sont en effet très fortes, en particulier lors des phases de production du cobalt et du nickel, employés dans les batteries NMC et NCA. Les cellules LFP dégainent encore ici un indéniable avantage environnemental.

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des "pluies acides".

Potentiel d'eutrophisation de l'eau

Parmi les autres externalités considérées par l'ACV, figure également le potentiel d'eutrophisation de l'eau, qui est lui aussi lié en grande partie aux émissions de NOx. Les émissions de NOx du VE sont dues à l'extraction des nombreux métaux nécessaires à la fabrication de la batterie.
Du fait des spécificités de son cycle (hautes températures, pressions élevées, et surtout fort excès d'air), le véhicule diesel émet davantage de monoxydes et surtout de dioxydes d'azote que son homologue essence, d'où un potentiel d'eutrophisation accru. Si le VE de 24kWh présente un gain face au diesel, celui-ci est réduit face à l'essence.

Potentiel de création d'ozone photochimique

Dernier indicateur considéré, la formation d'ozone est essentiellement due aux émissions de composés organiques volatiles (COV) par les motorisations essence et diesel. Si les VE n'en émettent naturellement pas en roulage, leurs émissions globales restent supérieures à celles des VT du fait de fortes émissions en phase de production, avec une forte dispersion liée à la composition et à la durée de vie de la batterie.
Les trois derniers critères évoqués affichent donc un bilan en demi-teinte, voire largement défavorable au VE (déplétion des ressources minérales notamment), a fortiori si on double la capacité de la batterie prise en hypothèse (50 vs 24kWh).

Pollution locale et émissions à l'échappement

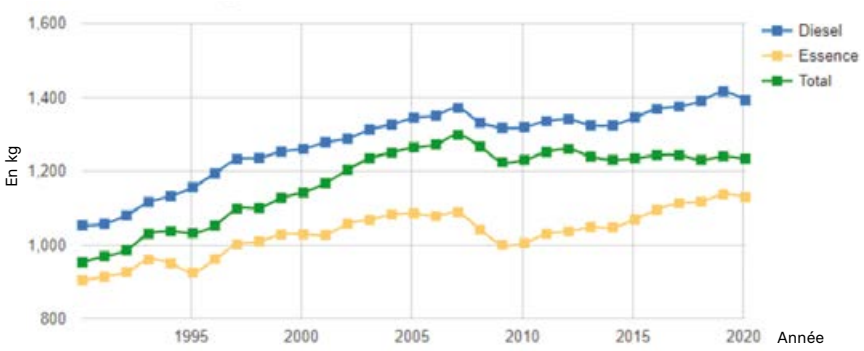
Bien qu'une ACV classique considère essentiellement des critères globaux, et ne propose donc pas de prendre en considération des impacts locaux comme la qualité de l'air, il est tentant d'intégrer les émissions locales à la réflexion. De fait, les transports routiers sont responsables d'une large part des émissions de polluants atmosphériques (54% des émissions de NOx, 14% des émissions de particules PM10 et 17% de celles de PM2,5) dont la réduction est un enjeu de santé publique. L'imminente norme Euro 7, appliquée dès juillet 2025, risque d'ailleurs d'abaisser encore les seuils.
Historiquement, les normes Euro, dont le dernier opus est l'Euro 6d, s'attaquaient uniquement aux émissions de polluants à l'échappement. Parmi ceux-ci, figurent les rejets de monoxyde de carbone CO, très toxique, qui empêchent les globules rouges de fixer l'oxygène, aujourd'hui réduits par un meilleur contrôle de la combustion. Sont également ciblés les composés organiques volatiles ou COV, et notamment les hydrocarbures imbrulés HC, tels le benzène et le toluène, réputés cancérigènes. Les catalyseurs les interceptent plutôt

efficacement, et leur subsistance en ville s'explique surtout par la multiplication de scooters à moteur 2 temps.
Les suies ou particules fines PM10 et PM2.5, émises surtout par les diesels à forte charge lors de combustions incomplètes, sont aussi scrutées de près. Le filtre à particules, apparu voici une vingtaine d'années, a certes permis de réduire le nombre de PM10 rejetées par les moteurs Diesel, mais ignore les particules les plus fines, précisément les plus susceptibles d'être aspirées dans les alvéoles pulmonaires et suspectées de favoriser le cancer du poumon.
Enfin, les oxydes d'azotes ou NOx évoqués précédemment, qui se forment à la combustion en excès d'air, concernent traditionnellement les diesels, mais aussi les derniers moteurs essence à injection directe. Si les constructeurs disposent depuis une dizaine d'année de dispositifs de réduction catalytique sélective SCR ou de filtres NOx Trap, le lecteur notera au passage que les latitudes d'action parfois (trop) savamment calculées de ces dispositifs ont été à l'origine du retentissant « Dieselgate ». Et par conséquent, du tropisme pro-électrique du législateur…

Les émissions hors échappement dans le collimateur ?

On l'a compris, le véhicule électrique sort à priori gagnant de cette dernière confrontation. Mais une nouvelle fois, la réalité se garde bien d'être simple. En effet, les efforts consacrès à la réduction des émissions ont porté leurs fruits, si bien que les études montrent qu'une large moitié des particules générées par le trafic routier en Europe ne proviennent plus de l'échappement. D'où viennent alors ces particules ? Selon le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne, les particules émises par les freins, les pneumatiques ou la chaussée sont devenues largement prépondérantes. Dans le détail, les freins (16 à 55% des PM10 selon les conditions de circulation), le contact pneu / chaussée (5 à 30 %) et la remise en suspension des particules (28 à 59%) se partagent le podium.
Dans l'Hexagone, la part du facteur abrasion a ainsi bondi de manière spectaculaire entre 1990 et 2019, passant de 15% à 59% pour les PM10, et de 9 à 45% pour les PM2,5. Si la généralisation du filtre à particules sur les véhicules diesel participe largement à ce résultat, l'impact de l'inflation pondérale des véhicules ne doit pas être sous-estimée. L'électrification du marché, qui s'accompagne non seulement

ÉVOLUTION DE LA MASSE MOYENNE - VÉHICULES PARTICULIERS VENDUS EN FRANCE

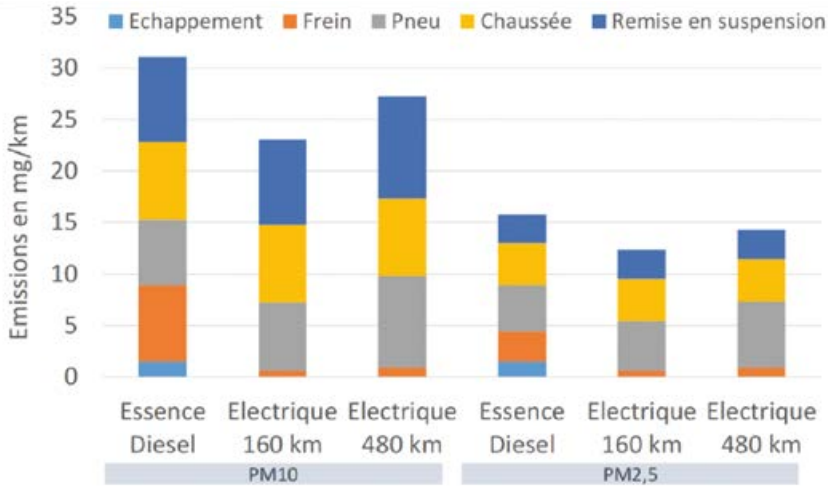


Source : carlabelling.ademe.fr/cfiffrescles2022

d'un alourdissement de l'ordre de 25% à silhouette équivalente, mais aussi d'une éviction des véhicules citadins (segment A voire B) au profit de SUV plus massifs et rémunérateurs permettant d'amortir les coûteuses batteries, semble malheureusement accélérer la tendance.

Freins, pneumatiques et revêtements routiers

Manifestement conscient que ce mouvement de fond est appelé à s'accentuer, le législateur semble bien décidé à examiner de plus près les émissions hors échappement. Encore en débat, l'imminente norme Euro 7 pourrait bien imposer un seuil d'émission de particules de freins, sinon de pneumatiques.
Quelles conséquences pour notre comparatif entre VE et VT ? Grâce au freinage régénératif, les VE ont le potentiel d'émettre moins de particules issues du système de freinage que les VT (respectivement 3 et 25% des PM10). En revanche, leur masse supérieure d'un quart influence la largeur des pneus et donc à la fois les émissions de particules pneus / chaussée (61 et 47%



des PM10) et les remises en suspension (36 et 28% des PHE PM10).
Par conséquent, les études récentes ne permettent plus d'établir un écart significatif d'émissions totales de particules entre le véhicule électrique et le véhicule thermique neuf, lequel n'émet presque plus de particules à l'échappement. Accordons toutefois au VE l'avantage de ne pas émettre de COV, lesquels peuvent contribuer à la formation de particules secondaires, et de n'être pas suspect d'un vieillissement aléatoire des dispositifs de traitement à l'échappement.

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.

Bilan de la confrontation : une victoire conditionnelle !

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.
Au terme de cette étude, qui s'intéresse particulièrement à ce dernier maillon, il apparaît clairement que départager les deux modes de propulsion est bien plus complexe encore qu'anticipé. Si le bilan du véhicule thermique est assez prévisible, celui du VE est bien plus dispersé, sensible à de multiples paramètres comme la taille de la batterie, sa nature chimique, le mix énergétique qui a permis de la produire, le bouquet électrique qui permettra de la recharger, et enfin sa longévité.
Il en résulte une situation paradoxale : en l'état actuel de la technique, le VE peut être le meilleur ou le pire des choix sur le plan environnemental. Sans grande surprise, un opulent VE visant à rapprocher son autonomie du thermique en misant sur la généreuse capacité (80 kWh, 100 kWh voire davantage) d'une lourde batterie (>500kg) produite dans un pays à l'énergie fortement carbonée, partira avec un handicap ACV pratiquement irrattrapable, sauf à rouler très longtemps (>300 000km) dans une région au mix vraiment peu carboné.

Le dilemme du VE

En creux, il est aisé d'identifier des leviers d'action efficaces pour améliorer le bilan ACV du véhicule électrique ! Un VE léger et sobre, alimenté par une batterie dimensionnée au plus juste, fabriqué et circulant dans une région au mix décarboné, et surtout utilisé de manière à prolonger au maximum sa durée de vie, pourra prétendre à un bilan bien plus favorable que celui du VT équivalent, au prix toutefois d'un rayon d'action quotidien drastiquement réduit.
Ici git le lièvre : trop dégrader l'autonomie plombe la polyvalence, alors fort éloignée de l'équivalent thermique ! En l'attente d'une hypothétique rupture technologique, le VE est-il pour autant condamné à sacrifier sa polyvalence sur l'autel du bilan ACV ? Ou inversement à s'affubler d'une batterie pesante et dispendieuse en espérant rivaliser avec l'autonomie du VT ? Terrible dilemme, qui pose la question de l'usage et de l'infrastructure. À court terme, la complémentarité entre VE et VT apparaît donc indéniable, leur hybridation (PHEV et HEV) offrant même un éventail de compromis aptes à satisfaire des usages encore très divers.

Une infrastructure adaptée, clef de l'autonomie ?

À plus long terme, le réseau électrique pourrait dénouer ce nœud gordien, dans la mesure où une infrastructure de recharge, économique et bien dimensionnée, peut rendre acceptable une autonomie plus modeste. Sur le seul terrain de la puissance de recharge, impossible de battre le VT. Remplir un réservoir de 60L en une minute à la station-service, c'est engloutir une dizaine de kWh/s, soit une puissance de 36 MW ! Les onéreuses bornes électriques dites « rapides », qui culminent à 150 kW ou plus rarement 350 kW, en sont loin. En l'état actuel de la technique, recharger en moins d'1/2h voire d'1/4h (C-Rates > 2 et 4) sollicite pourtant les batteries, au détriment de leur longévité, et implique surtout des investissements massifs hasardeux à amortir. Les recherches pour diviser par 10 le temps de recharge se heurtent donc non seulement à la thermique des cellules (C-Rate x10) mais aussi à la puissance à délivrer aux bornes (VP et poids lourds).
Le développement d'un réseau bien plus étoffé, en contrepartie d'une puissance de charge limitée, proche de 50kWh, pourrait donc constituer un compromis acceptable, catalyseur à l'adoption du VE. Et surtout l'opportunité de déployer des recharges hors domicile à des prix plus décents. Notons au passage que le prix de l'électricité domestique (0,18€/kWh environ) est analogue à celui du gazole et du SP95 (resp. 0,17 et 0,19€/kWh, à raison de 11,2 et 9,2kWh/L). C'est bien l'exceptionnel rendement du VE qui autorise lors des recharges à domicile un coût d'usage si réduit, du même facteur 3 ou 4.

La mobilité électrique, une opportunité de flexibilité énergétique !

À ce propos, faut-il s'inquiéter d'un bond de la consommation électrique à l'échelle de l'Hexagone ? Notre dernier « plein feux » (#879 de 11/2022) tirait un constat rassurant. Le parc français actuel (41M de véhicules âgés de 11 ans en moyenne) se renouvelle de manière très progressive. Aussi, l'hypothèse d'un parc électrique (BEV et PHEV) de 10Mv en 2035, et 40Mv en 2050 apparaît cohérente. Une consommation de 150 Wh/km et un kilométrage annuel de 12 000 km porteraient le besoin à 18 et 72 TWh/an en 2035 et 2050. Compatible avec la croissance de la production électrique hexagonale, proche de 532TWh en 2021, projetée à 645 TWh en 2050 sous l'effet conjugué de la croissance du renouvelable et de l'ajout de quelques tranches nucléaires.

Cerise sur le gâteau, le VE décoche même un argument massue : sa diffusion offre une belle opportunité de lisser la consommation électrique. Un soutien inespéré pour les énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et le photovoltaïque ! En effet, les batteries des VE connectés au réseau, si leur recharge est pilotée dynamiquement, peuvent jouer le rôle de variables d'ajustement et attendre le moment opportun pour déclencher leur charge. Mieux encore, les systèmes bidirectionnels (V2G) peuvent soulager ledit réseau, en restituant de l'énergie pour combler les besoins ponctuels lors des pics de charge avant de recharger en heures creuses. Un coup de pouce à RTE qui pourrait bien entendu faire l'objet d'une valorisation économique. Enfin, au terme de la vie du véhicule, la batterie peut être utilisée comme moyen de stockage stationnaire moyennant des coûts de reconditionnement limités. Autant de moyens d'améliorer le bilan ACV !

Le retour en grâce des règles élémentaires de la physique ?

Un autre levier pour concilier ACV et autonomie : la chasse aux gaspis, qui nous replonge dans l'atmosphère post chocs pétroliers. Légèreté, aérodynamique, efficience : assisterait-on enfin au retour en grâce des lois les plus élémentaires de la physique, quelque peu malmenées ces dernières années ? L'actuelle érosion du segment A, voire du segment B, jugés peu rémunérateurs, au profit d'une offre faisant la part belle aux SUV peut en faire douter de prime abord.

Mais la nature a horreur du vide. La disparition de nombreuses citadines européennes crée un appel d'air, dans lequel pourrait bien s'engouffrer une nouvelle offre, dédiée à la mobilité de proximité, urbaine ou interurbaine. La mobilité intermédiaire, micro ou mini-mobilité, constitue ainsi un terrain de jeu en plein essor. En témoigne l'effervescence régnant dans le domaine du quadricycle (léger L6e ou lourd L7e), massivement représenté au dernier Mondial, qui, outre les Citroën Ami ou Mobilize Duo, voit débouler nombre de nouveaux acteurs (Microlino, Eon Motors, XEV, Silence…). Bien aidées par les technologies du numérique, les pratiques de mobilité se réinventent, et de nouveaux services émergent, comme l'autopartage, fondés sur l'usage plutôt que sur la propriété. Gare naturellement à l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons : si elle se substitue à la marche ou à la bicyclette, cette nouvelle mobilité n'apportera aucun gain !

L'évolution des mœurs, associant covoiturage, éco-conduite et modération de l'usage, via notamment la réduction des trajets pendulaires (télétravail), aura naturellement un rôle essentiel à jouer.

Plus radicales encore dans leur obsession de frugalité, d'autres initiatives se font jour, avec pour objectif d'optimiser le rayon d'action en limitant drastiquement la masse du véhicule et la taille de la batterie. Parmi les plus marquantes, citons l'Extrême Défi impulsé par l'ADEME, terrain de jeu fertile pour son instigateur Georges Plassat et pour quelques poignées de passionnés, dont les projets souvent ultralégers (<150kg) rompent délibérément avec les codes traditionnels. Mais c'est une autre histoire, à découvrir dans un prochain dossier… ●

véhicule du segment B représentatif du marché actuel, et qu'un SUV affublé d'une grosse batterie de 80 ou 100kWh dépassera assez facilement 25t CO_2eq avant le premier tour de roue. Un handicap dur à compenser !

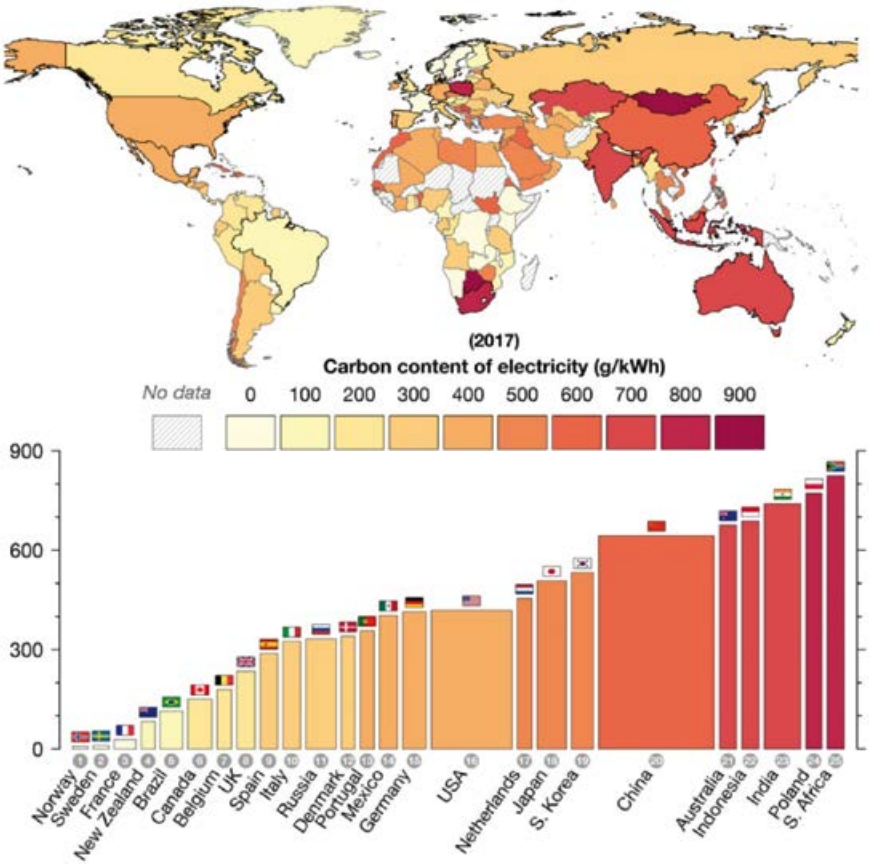
Le bouquet énergétique, clef de voûte de l'impact climatique !

Pour se rattraper, le VE compte sur des émissions réduites en phase d'usage. Toutefois, ce levier n'est pas du ressort des constructeurs automobiles, mais dépend du bouquet ou mix électrique. En phase de roulage, le mode de production de l'électricité devient en effet prépondérant, ce qui offre des perspectives très diverses en fonction des zones géographiques et des bouquets électriques associés, dont le contenu carbone fluctue entre 0 et 900g/kWh, ainsi que l'illustre la carte ci-dessous. Pour mieux comprendre cet état de fait, il faut se pencher sur la production d'électricité, assurée depuis la fin du XIX^{e} siècle par des centrales électriques qui transforment des énergies primaires, via des générateurs électriques alimentés en combustible fossile (charbon, gaz ou pétrole) ou en combustible organique (biomasse, déchets), en énergie nucléaire, hydroélectrique, éolienne ou solaire.

Mix électrique : enjeux et perspectives

Représentant 20% de la consommation mondiale d'énergie finale, l'électricité s'appuie encore majoritairement (61%) sur des sources fossiles (charbon et gaz essentiellement). Le solde est issu du nucléaire pour 10% et des énergies renouvelables pour 28% (hydroélectricité 17%, éolien 6%, solaire 3%, biomasse 2%, géothermie 0,4%). La Chine (29%) et les États-Unis (16%) totalisent 45% de la production mondiale. Les intensités carbone correspondantes sont très disparates : 820g/kWh en moyenne pour les centrales à charbon (voire 1 150g/kWh pour le lignite), 490g/kWh pour le gaz, mais moins de 50g/kWh pour le photovoltaique, voire moins de 25g/kWh pour l'hydraulique, le nucléaire, et l'éolien.

Du fait de cette disparité, il est paradoxalement aisé de déterminer un seuil à partir duquel le VE émettra davantage de



GES lors de la seule phase d'usage. Considérons une citadine diesel consommant 5L/100km, ce qui correspond à des émissions de CO_2 de 130g/km, et son homologue électrique absorbant 150 Wh/km, soit quelques 200 Wh/km en intégrant les pertes du chargeur et du réseau. Un rapide quotient permet d'établir qu'au-delà de 650g/kWh, la production d'énergie électrique génère davantage de GES par km que les émissions du VT équivalent. Un impact qui s'ajoute naturellement à l'empreinte carbone initiale de la fabrication. Autant dire qu'un véhicule électrique circulant en Inde, en Chine ou en Pologne pourra difficilement être considéré comme une solution au dérèglement climatique. Quoique lente, la réduction tendancielle des intensités carbone constitue en revanche un motif d'espoir…

Conséquences climatiques bien différentes d'un pays à l'autre

Corollaire des constats précédents : un hypothétique gain environnemental repose sur un usage prolongé dans une région au mix de production d'électricité le plus décarboné possible.

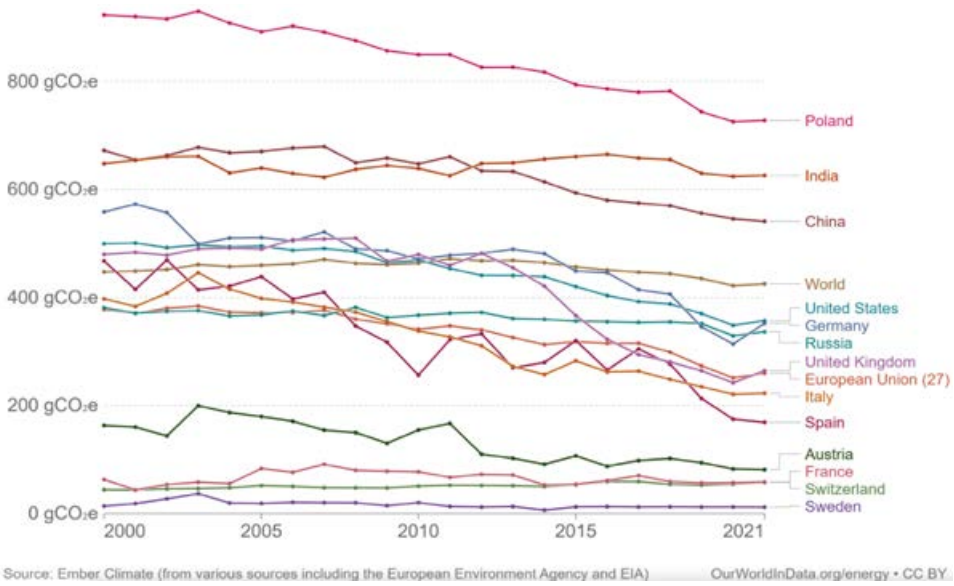
La comparaison entre la France et l'Allemagne est édifiante. En 2021, la production d'électricité française de 532 TWh, dominée à 70% par le nucléaire (361 TWh), suivi par l'hydraulique (10%) et le thermique (surtout gaz), et plus marginalement l'éolien et le solaire, est largement décarbonée (58gCO_2/kWh). Le mix allemand, encore largement tributaire du charbon et du gaz, s'est certes amélioré entre 2012 et 2021 (482 et 352gCO_2/kWh) mais demeure 6 fois plus intense en GES.

L'ACV publiée par l'ADEME illustre bien cette différence de dynamique. Les « intensités carbone » respectives de la France et de l'Allemagne en 2012 (73g vs 482gCO_2/kWh)

L'ACV publiée par l'ADEME illustre bien cette différence de dynamique. Les "intensités carbone" respectives de la France et de l'Allemagne en 2012 (73g vs 482gCO_2/kWh) se traduisent ainsi par des pentes bien différentes.

CARBON INTENSITY OF ELECTRICITY, 2000 TO 2021

Carbon intensity is measured in grams of carbon dioxide-equivalents emitted per kilowatt-hour of electricity



se traduisent ainsi par des pentes bien différentes. Logiquement, le véhicule électrique rattrape d'autant plus facilement son handicap initial qu'il bénéficiera d'une énergie faiblement carbonée pour charger ses batteries. En prenant en compte l'ensemble des variabilités sur chaque paramètre, l'ADEME conclut que les impacts d'un VT et d'un VE sont comparables au terme de leur durée de vie dans un pays au mix aussi carboné que l'Allemagne de 2012, en dépit d'hypothèses de travail (batterie très modeste notamment) biaisées au profit du VE.

Un mix peu carboné et une durée de vie supérieure du VE, principaux leviers d'action

Une actualisation du graphique pour tenir compte de l'amélioration par l'Allemagne de son intensité carbone (352gCO_2/kWh en 2020) serait de nature à bonifier les résultats. Las, l'adoption d'une batterie de 50kWh, plus proche de la réalité du marché, annule ce bénéfice : le VE demande toujours plus de 150 000km pour combler son handicap initial.

Dans des pays dont l'énergie est moins carbonée comme la France, la Norvège, la Suède ou la Suisse, le VE prend en revanche progressivement l'avantage à l'usage. Vers 25 000km dans le cas d'une citadine avec une modeste batterie de 24kWh, ou plus vraisemblablement au-delà 80 000km avec une batterie de 50kWh. Chaque kilomètre supplémentaire parcouru permettant alors de creuser l'écart, la longévité potentiellement supérieure du VE, plus simple de conception, constitue un atout.

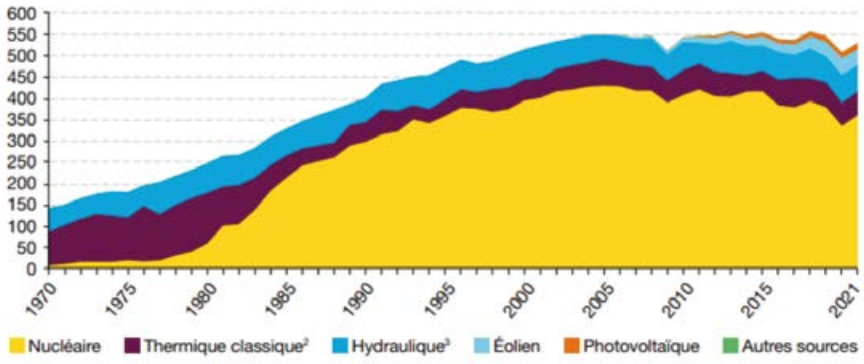
Deux leviers s'imposent comme des évidences pour modérer les émissions du VE. Le premier consiste à modérer la taille de la batterie et à favoriser la production des VE dans des usines au mix peu carboné, ce qui peut placer la France en position favorable. Le second levier consiste à encourager l'automobiliste à conserver durablement son véhicule ce qui peut entrer en conflit avec une logique économique de renouvellement et fait donc malheureusement l'objet de peu d'incitations gouvernementales.

Hydrogène et agro-carburants, sources de décarbonation ?

L'hydrogène ou les agro-carburants modifieraient-ils cette conclusion ? Les agro-carburants constituent une piste intéressante, du fait de leur caractère renouvelable. L'éthanol issu de déchets de canne à sucre ou de betteraves, introduit largement dans des agro-carburants comme l'E85, peut ainsi réduire de 70% les émissions de GES des véhicules essence, tandis que de nombreuses huiles peuvent remplacer le gazole. Pour autant, si la seconde génération d'agro-carburants issus de résidus forestiers et agricoles limite la compétition avec l'alimentaire, les capacités de production restent pour l'heure trop limitées pour supplanter le fossile.

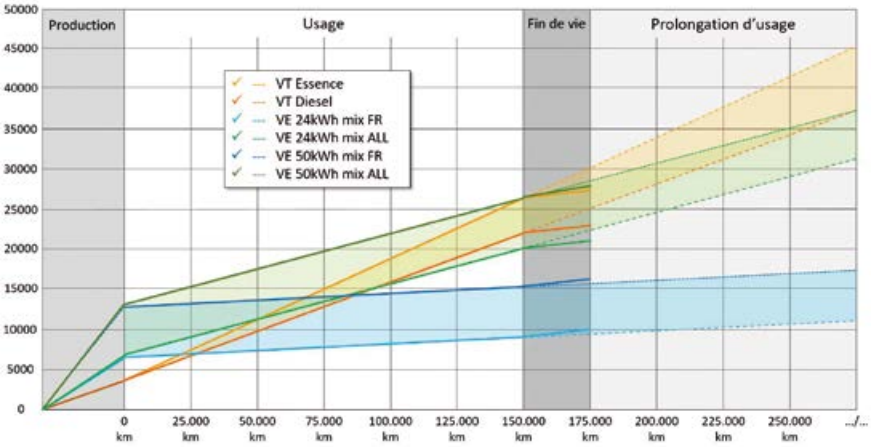
L'hydrogène, de son côté, présente un bilan plus contrasté. L'hydrogène fossile ou « gris », actuellement largement majoritaire (95%), et souvent issu du reformage du méthane, s'avère logiquement bien loin d'améliorer le bilan carbone. L'hydrogène issu d'électrolyse, alimentant une pile à combustible ou pire encore un moteur à combustion interne, reste pénalisé par une

PRODUCTION NETTE D'ÉLECTRICITÉ
Total : 532 TWH en 2021
En TWh[1]



[1] *TWh = 1 milliard de kWh.*
[2] *Thermique à combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel), biomasse ou déchets.*
[3] *Y compris énergie marémotrice.*
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.
À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.
***Sources** : SDES, Bilan énergétique de la France*

POTENTIEL DE CHANGEMENT CLIMATIQUE (kg CO_2 éq)
VG D'APRÈS DIVERSES SOURCES DONT ACV ADEME



chaîne de transformations au rendement particulièrement médiocre, et requiert au moins 3 fois plus d'énergie que la solution à batterie équivalente, ce qui grève d'autant l'intensité carbone du mix initial. Le principal intérêt de ce vecteur énergétique en termes de décarbonation serait donc sa capacité à stocker l'électricité perdue issue de sources intermittentes (éolien et solaire), afin de permettre leur pilotage et de favoriser leur croissance dans le mix. L'intensité décarbonante de l'hydrogène, exprimée en tCO_2e / tH2, étant fort disparate selon les usages, la dernière étude de Carbone 4 recommande d'ailleurs de prioriser les usages industriels comme la réduction du minerai de fer dans les aciéries, la production d'ammoniac ou de méthanol, voire dans une moindre mesure la mobilité maritime, ferroviaire ou aérienne.

Épuisement des ressources fossiles, l'épée de Damoclès du peak-oil

Si le fossile domine, les lois physiques sont têtues : une ressource limitée et non renouvelable aux échelles de temps humaines a vocation à s'épuiser. Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile étaient estimées à 40 517 EJ en 2020, selon l'Agence fédérale allemande, dont 55% de charbon, 25% de pétrole et 19% de gaz naturel. De quoi assurer en apparence quelques décennies de production au rythme actuel : 56 ans pour le pétrole, 54 ans pour le gaz naturel, 139 ans pour le charbon. Pour autant, l'effritement du taux de retour énergétique (EROI), qui mesure la difficulté à extraire les hydrocarbures, témoigne de l'imminence du fameux peak-oil, maintes fois annoncé et repoussé par l'évolution des techniques et l'exploitation du pétrole de roche mère (gaz/pétrole de schiste).

Un constat qui vaut également pour les ressources minérales. Avec les techniques actuelles, les réserves d'uranium pourraient durer 90 à 130 ans, voire davantage en usant de surgénération ou, à terme, de fusion nucléaire. Le potentiel exploitable de l'énergie solaire est quant à lui estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle, mais photovoltaïque comme éolien reposent eux-mêmes sur l'usage de minerais en cours d'épuisement. La quadrature du cercle…

Sans surprise, le VT, qui consomme des hydrocarbures sur l'ensemble de son cycle de vie, voit sa contribution à l'épuisement des ressources fossiles s'accroître de manière linéaire au fur et au mesure de son utilisation. Le VE quant à lui, friand de ressources fossiles à la fabrication, peut compenser ce retard si sa batterie est modeste et se recharge en électricité d'origine non fossile. Logiquement, la comparaison des ACV vis-à-vis de l'épuisement des ressources fossiles apparaît donc presque calquée sur celle des GES. Tempérons toutefois cette conclusion en objectant que le minerai d'uranium, non intégré à l'équation puisque de nature non fossile, n'en constitue pas moins une ressource limitée dont la déplétion doit être prise en compte.

Potentiel d'épuisement des ressources minérales

Un autre risque majeur, tant environnemental que stratégique, tient donc à la consommation accrue de matières premières et minerais stratégiques, dont certains sont jugés critiques. Médiatisé il y a 5 ans par Guillaume Pitron (La guerre des métaux rares), ce sujet a longtemps constitué un angle mort de l'ACV. Récemment abordé avec précision dans nos colonnes (Dossier #878 de 07/2022), ce sujet préoccupe enfin le gouvernement, qui a récemment confié à Philippe Varin l'analyse de la sécurisation de l'approvisionnement industriel.

Dans ce domaine, le VE présente un impact largement plus préoccupant que celui du VT. En effet, si ce dernier requiert des catalyseurs réputés gourmands en platinoïdes rares (platine, palladium, rhodium), dont le cours dépasse parfois celui de l'or et dont les imminentes normes Euro 7 ne seront pas de nature à modérer l'usage, les quantités associées demeurent en réalité assez anecdotiques (2 à 10g).

chaîne de transformations au rendement particulièrement médiocre, et requiert au moins 3 fois plus d'énergie que la solution à batterie équivalente, ce qui grève d'autant l'intensité carbone du mix initial. Le principal intérêt de ce vecteur énergétique en termes de décarbonation serait donc sa capacité à stocker l'électricité perdue issue de sources intermittentes (éolien et solaire), afin de permettre leur pilotage et de favoriser leur croissance dans le mix. L'intensité décarbonante de l'hydrogène, exprimée en tCO_2e / tH2, étant fort disparate selon les usages, la dernière étude de Carbone 4 recommande d'ailleurs de prioriser les usages industriels comme la réduction du minerai de fer dans les aciéries, la production d'ammoniac ou de méthanol, voire dans une moindre mesure la mobilité maritime, ferroviaire ou aérienne.

Épuisement des ressources fossiles, l'épée de Damoclès du peak-oil

Si le fossile domine, les lois physiques sont têtues : une ressource limitée et non renouvelable aux échelles de temps humaines a vocation à s'épuiser. Les réserves mondiales prouvées d'énergie fossile étaient estimées à 40 517 EJ en 2020, selon l'Agence fédérale allemande, dont 55% de charbon, 25% de pétrole et 19% de gaz naturel. De quoi assurer en apparence quelques décennies de production au rythme actuel : 56 ans pour le pétrole, 54 ans pour le gaz naturel, 139 ans pour le charbon. Pour autant, l'effritement du taux de retour énergétique (EROI), qui mesure la difficulté à extraire les hydrocarbures, témoigne de l'imminence du fameux peak-oil, maintes fois annoncé et repoussé par l'évolution des techniques et l'exploitation du pétrole de roche mère (gaz/pétrole de schiste).

Un constat qui vaut également pour les ressources minérales. Avec les techniques actuelles, les réserves d'uranium pourraient durer 90 à 130 ans, voire davantage en usant de surgénération ou, à terme, de fusion nucléaire. Le potentiel exploitable de l'énergie solaire est quant à lui estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle, mais photovoltaïque comme éolien reposent eux-mêmes sur l'usage de minerais en cours d'épuisement. La quadrature du cercle…

Sans surprise, le VT, qui consomme des hydrocarbures sur l'ensemble de son cycle de vie, voit sa contribution à l'épuisement des ressources fossiles s'accroître de manière linéaire au fur et au mesure de son utilisation. Le VE quant à lui, friand de ressources fossiles à la fabrication, peut compenser ce retard si sa batterie est modeste et se recharge en électricité d'origine non fossile. Logiquement, la comparaison des ACV vis-à-vis de l'épuisement des ressources fossiles apparaît donc presque calquée sur celle des GES. Tempérons toutefois cette conclusion en objectant que le minerai d'uranium, non intégré à l'équation puisque de nature non fossile, n'en constitue pas moins une ressource limitée dont la déplétion doit être prise en compte.

Potentiel d'épuisement des ressources minérales

Un autre risque majeur, tant environnemental que stratégique, tient donc à la consommation accrue de matières premières et minerais stratégiques, dont certains sont jugés critiques. Médiatisé il y a 5 ans par Guillaume Pitron (La guerre des métaux rares), ce sujet a longtemps constitué un angle mort de l'ACV. Récemment abordé avec précision dans nos colonnes (Dossier #878 de 07/2022), ce sujet préoccupe enfin le gouvernement, qui a récemment confié à Philippe Varin l'analyse de la sécurisation de l'approvisionnement industriel.

Dans ce domaine, le VE présente un impact largement plus préoccupant que celui du VT. En effet, si ce dernier requiert des catalyseurs réputés gourmands en platinoïdes rares (platine, palladium, rhodium), dont le cours dépasse parfois celui de l'or et dont les imminentes normes Euro 7 ne seront pas de nature à modérer l'usage, les quantités associées demeurent en réalité assez anecdotiques (2 à 10g).

Des moteurs souvent friands de terres rares

Les lumières sont donc cette fois braquées sur les VE, friands de nombreuses ressources minérales, tant dans la confection des moteurs que des batteries. La plupart des moteurs synchrones à destination automobile nécessitent ainsi des aimants permanents puissants, qui utilisent les fameuses « terres rares » aujourd'hui fort médiatisées comme le néodyme, le dysprosium ou encore le terbium. Davantage que leur rareté supposée, c'est bien leur faible concentration qui rend leur exploitation énergivore, polluante, et si peu attractive que la Chine en détient en pratique le monopole (95%).

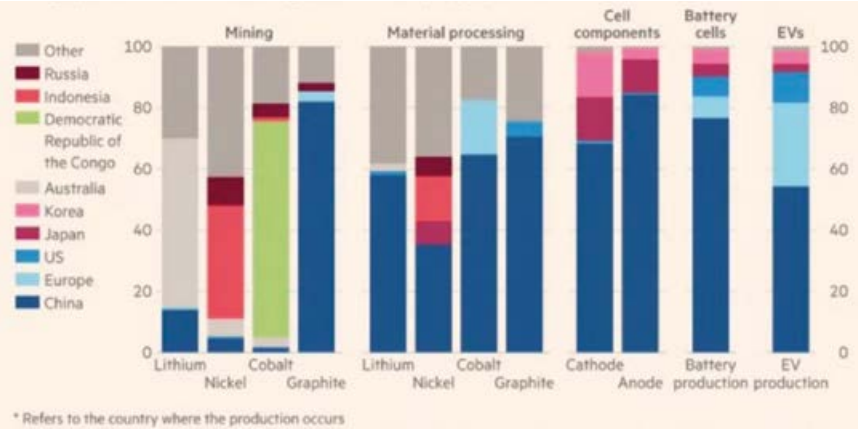
Sans recourir à la substitution d'une partie du néodyme par du lanthane ou du cérium, explorée par Toyota, certains constructeurs sont parvenus à se passer d'aimant en optant pour des moteurs synchrones à rotors bobinés. C'est notamment le cas de Renault sur la Zoe ou plus récemment de Tesla sur le moteur avant des versions intégrales. Plus encombrante et plus lourde, cette solution générant le champ magnétique via une bobine requiert en revanche un onduleur et davantage de cuivre, métal assez abondant et aisé à recycler mais de plus en plus demandé.

Des batteries très lourdes et gourmandes en ressources

De son côté, la batterie Lithium-ion, qui s'est généralisée depuis une décennie dans les châssis des véhicules électriques, réclame environ 2% en masse de lithium, soit quelques 7kg sur un véhicule de gamme intermédiaire de type Renault Zoe (50kWh) ou VW ID3 (58kWh). Un métal alcalin, principal composant de l'électrolyte, qui représente déjà 10% du coût des batteries et dont les cours s'envolent en raison de l'explosion de la demande, laquelle devrait être multipliée par 35 d'ici 2050. Cinquante nouvelles mines sont programmées, pour certaines en France, laissant augurer de l'impact d'une exploitation nécessitant de grandes quantités d'eau et parfois d'adjuvants chimiques.

Les batteries les plus répandues sur le marché, à savoir l'omniprésente NMC (Nickel, Manganèse, Cobalt) et dans une moindre mesure la chimie NCA (Nickel, Cobalt, Aluminium), utilisée notamment par Tesla, réclament également du nickel et du cobalt dans leur cathode. Si le premier est relativement abondant, 70% des quantités étant encore destinées à la fabrication d'aciers inoxydables, le second est régulièrement sous le feu des projecteurs du fait de ses conditions d'extraction, très discutables sur le plan social et environnemental.

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE GLOBAL EV BATTERY SUPPLY CHAIN (%)



Nouvelles chimies : entre parcimonie et substitution

Pour réduire cette dépendance au cobalt, qui représente autour de 4% de la masse de la batterie (entre 11 et 18kg environ), les chimistes en réduisent la proportion en substituant aux NMC 111 des chimies NMC 622 voir NMC811, parvenant parfois à limiter à 10% la proportion de ce métal. Tesla suit la même feuille de route en peaufinant des cellules de chimie NCA 811.

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse. Si leur moindre densité énergétique (-22% environ) les cantonne souvent à l'entrée de gamme, leur coût plus modéré et leur chimie exempte de cobalt et de nickel devraient leur octroyer un rôle de plus en plus central.

Plus sûres car plus stables chimiquement et moins sensible à l'emballement thermique, plus endurantes et durables car supportant davantage de cycles de charge et de décharge, elles pourraient se généraliser à court terme sur le segment B, voire les segments intermédiaires. Tesla utilise déjà des batteries LFP sans cobalt fournies par CATL et BYD sur l'entrée de gamme des Model 3 et Y, et le Losange a également fait le choix du LFP pour la future R5 électrique construite sur la plateforme CMF-B EV.

La mise en place d'une véritable économie circulaire, alimentée par des filières de recyclage plus structurées, constitue sans conteste le meilleur levier pour amé-

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse.

liorer le bilan ACV du VE, tout en réduisant la dépendance géopolitique associée à la mobilité.

L'acidification atmosphérique

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des « pluies acides ». À la clef, une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation. Parmi les substances participant à ce phénomène figurent entre autres les SO_2, NOx, NH_3, HCl, HF.
Pour les VT, ce potentiel d'acidification est essentiellement lié aux émissions des raffineries (SO_2 et NOx), voire aux émissions de NOx en roulage, principalement du diesel. Toutefois, les scénarii modélisés, en France comme en Allemagne, mettent en évidence une contribution accrue du VE de 24 kWh sur cet indicateur, quel que soit le kilométrage parcouru.
À l'origine de cette flambée, figurent la production d'électricité et surtout la fabrication de la batterie. Les émissions de SO_2 pendant la phase d'extraction des métaux nécessaires à l'élaboration de la batterie sont en effet très fortes, en particulier lors des phases de production du cobalt et du nickel, employés dans les batteries NMC et NCA. Les cellules LFP dégainent encore ici un indéniable avantage environnemental.

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des "pluies acides".

Potentiel d'eutrophisation de l'eau

Parmi les autres externalités considérées par l'ACV, figure également le potentiel d'eutrophisation de l'eau, qui est lui aussi lié en grande partie aux émissions de NOx. Les émissions de NOx du VE sont dues à l'extraction des nombreux métaux nécessaires à la fabrication de la batterie.
Du fait des spécificités de son cycle (hautes températures, pressions élevées, et surtout fort excès d'air), le véhicule diesel émet davantage de monoxydes et surtout de dioxydes d'azote que son homologue essence, d'où un potentiel d'eutrophisation accru. Si le VE de 24kWh présente un gain face au diesel, celui-ci est réduit face à l'essence.

Potentiel de création d'ozone photochimique

Dernier indicateur considéré, la formation d'ozone est essentiellement due aux émissions de composés organiques volatiles (COV) par les motorisations essence et diesel. Si les VE n'en émettent naturellement pas en roulage, leurs émissions globales restent supérieures à celles des VT du fait de fortes émissions en phase de production, avec une forte dispersion liée à la composition et à la durée de vie de la batterie.
Les trois derniers critères évoqués affichent donc un bilan en demi-teinte, voire largement défavorable au VE (déplétion des ressources minérales notamment), a fortiori si on double la capacité de la batterie prise en hypothèse (50 vs 24kWh).

Pollution locale et émissions à l'échappement

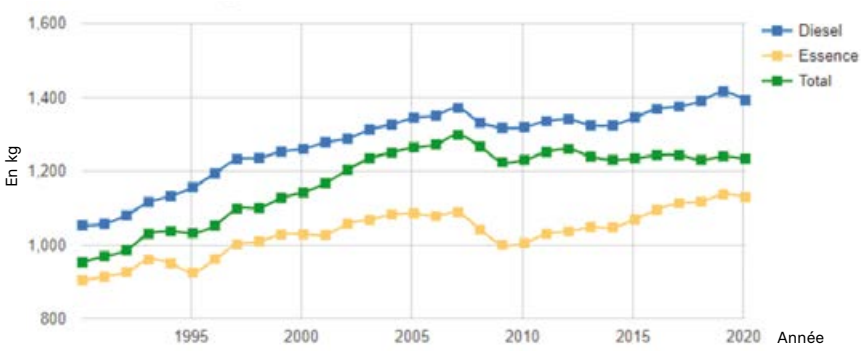
Bien qu'une ACV classique considère essentiellement des critères globaux, et ne propose donc pas de prendre en considération des impacts locaux comme la qualité de l'air, il est tentant d'intégrer les émissions locales à la réflexion. De fait, les transports routiers sont responsables d'une large part des émissions de polluants atmosphériques (54% des émissions de NOx, 14% des émissions de particules PM10 et 17% de celles de PM2,5) dont la réduction est un enjeu de santé publique. L'imminente norme Euro 7, appliquée dès juillet 2025, risque d'ailleurs d'abaisser encore les seuils.
Historiquement, les normes Euro, dont le dernier opus est l'Euro 6d, s'attaquaient uniquement aux émissions de polluants à l'échappement. Parmi ceux-ci, figurent les rejets de monoxyde de carbone CO, très toxique, qui empêchent les globules rouges de fixer l'oxygène, aujourd'hui réduits par un meilleur contrôle de la combustion. Sont également ciblés les composés organiques volatiles ou COV, et notamment les hydrocarbures imbrulés HC, tels le benzène et le toluène, réputés cancérigènes. Les catalyseurs les interceptent plutôt

efficacement, et leur subsistance en ville s'explique surtout par la multiplication de scooters à moteur 2 temps.
Les suies ou particules fines PM10 et PM2.5, émises surtout par les diesels à forte charge lors de combustions incomplètes, sont aussi scrutées de près. Le filtre à particules, apparu voici une vingtaine d'années, a certes permis de réduire le nombre de PM10 rejetées par les moteurs Diesel, mais ignore les particules les plus fines, précisément les plus susceptibles d'être aspirées dans les alvéoles pulmonaires et suspectées de favoriser le cancer du poumon.
Enfin, les oxydes d'azotes ou NOx évoqués précédemment, qui se forment à la combustion en excès d'air, concernent traditionnellement les diesels, mais aussi les derniers moteurs essence à injection directe. Si les constructeurs disposent depuis une dizaine d'année de dispositifs de réduction catalytique sélective SCR ou de filtres NOx Trap, le lecteur notera au passage que les latitudes d'action parfois (trop) savamment calculées de ces dispositifs ont été à l'origine du retentissant « Dieselgate ». Et par conséquent, du tropisme pro-électrique du législateur…

Les émissions hors échappement dans le collimateur ?

On l'a compris, le véhicule électrique sort à priori gagnant de cette dernière confrontation. Mais une nouvelle fois, la réalité se garde bien d'être simple. En effet, les efforts consacrès à la réduction des émissions ont porté leurs fruits, si bien que les études montrent qu'une large moitié des particules générées par le trafic routier en Europe ne proviennent plus de l'échappement. D'où viennent alors ces particules ? Selon le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne, les particules émises par les freins, les pneumatiques ou la chaussée sont devenues largement prépondérantes. Dans le détail, les freins (16 à 55% des PM10 selon les conditions de circulation), le contact pneu / chaussée (5 à 30 %) et la remise en suspension des particules (28 à 59%) se partagent le podium.
Dans l'Hexagone, la part du facteur abrasion a ainsi bondi de manière spectaculaire entre 1990 et 2019, passant de 15% à 59% pour les PM10, et de 9 à 45% pour les PM2,5. Si la généralisation du filtre à particules sur les véhicules diesel participe largement à ce résultat, l'impact de l'inflation pondérale des véhicules ne doit pas être sous-estimée. L'électrification du marché, qui s'accompagne non seulement

ÉVOLUTION DE LA MASSE MOYENNE - VÉHICULES PARTICULIERS VENDUS EN FRANCE

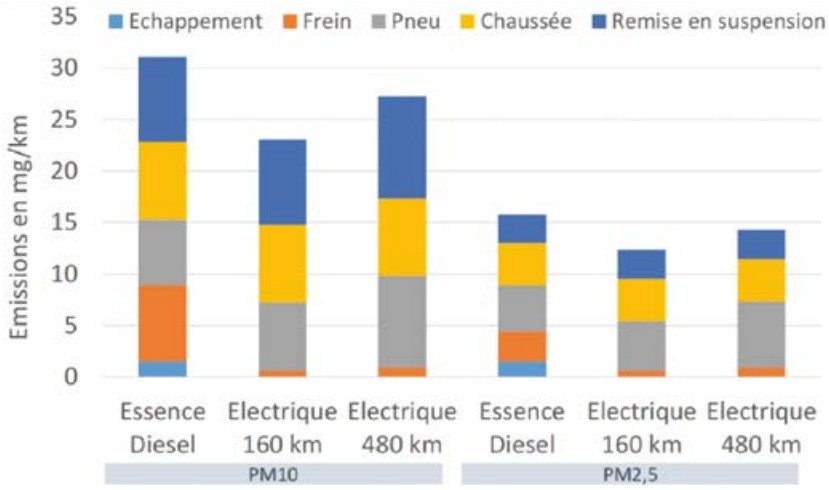


Source : carlabelling.ademe.fr/cfiffrescles2022

d'un alourdissement de l'ordre de 25% à silhouette équivalente, mais aussi d'une éviction des véhicules citadins (segment A voire B) au profit de SUV plus massifs et rémunérateurs permettant d'amortir les coûteuses batteries, semble malheureusement accélérer la tendance.

Freins, pneumatiques et revêtements routiers

Manifestement conscient que ce mouvement de fond est appelé à s'accentuer, le législateur semble bien décidé à examiner de plus près les émissions hors échappement. Encore en débat, l'imminente norme Euro 7 pourrait bien imposer un seuil d'émission de particules de freins, sinon de pneumatiques.
Quelles conséquences pour notre comparatif entre VE et VT ? Grâce au freinage régénératif, les VE ont le potentiel d'émettre moins de particules issues du système de freinage que les VT (respectivement 3 et 25% des PM10). En revanche, leur masse supérieure d'un quart influence la largeur des pneus et donc à la fois les émissions de particules pneus / chaussée (61 et 47%



des PM10) et les remises en suspension (36 et 28% des PHE PM10).
Par conséquent, les études récentes ne permettent plus d'établir un écart significatif d'émissions totales de particules entre le véhicule électrique et le véhicule thermique neuf, lequel n'émet presque plus de particules à l'échappement. Accordons toutefois au VE l'avantage de ne pas émettre de COV, lesquels peuvent contribuer à la formation de particules secondaires, et de n'être pas suspect d'un vieillissement aléatoire des dispositifs de traitement à l'échappement.

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.

Bilan de la confrontation : une victoire conditionnelle !

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.
Au terme de cette étude, qui s'intéresse particulièrement à ce dernier maillon, il apparaît clairement que départager les deux modes de propulsion est bien plus complexe encore qu'anticipé. Si le bilan du véhicule thermique est assez prévisible, celui du VE est bien plus dispersé, sensible à de multiples paramètres comme la taille de la batterie, sa nature chimique, le mix énergétique qui a permis de la produire, le bouquet électrique qui permettra de la recharger, et enfin sa longévité.
Il en résulte une situation paradoxale : en l'état actuel de la technique, le VE peut être le meilleur ou le pire des choix sur le plan environnemental. Sans grande surprise, un opulent VE visant à rapprocher son autonomie du thermique en misant sur la généreuse capacité (80 kWh, 100 kWh voire davantage) d'une lourde batterie (>500kg) produite dans un pays à l'énergie fortement carbonée, partira avec un handicap ACV pratiquement irrattrapable, sauf à rouler très longtemps (>300 000km) dans une région au mix vraiment peu carboné.

Le dilemme du VE

En creux, il est aisé d'identifier des leviers d'action efficaces pour améliorer le bilan ACV du véhicule électrique ! Un VE léger et sobre, alimenté par une batterie dimensionnée au plus juste, fabriqué et circulant dans une région au mix décarboné, et surtout utilisé de manière à prolonger au maximum sa durée de vie, pourra prétendre à un bilan bien plus favorable que celui du VT équivalent, au prix toutefois d'un rayon d'action quotidien drastiquement réduit.
Ici git le lièvre : trop dégrader l'autonomie plombe la polyvalence, alors fort éloignée de l'équivalent thermique ! En l'attente d'une hypothétique rupture technologique, le VE est-il pour autant condamné à sacrifier sa polyvalence sur l'autel du bilan ACV ? Ou inversement à s'affubler d'une batterie pesante et dispendieuse en espérant rivaliser avec l'autonomie du VT ? Terrible dilemme, qui pose la question de l'usage et de l'infrastructure. À court terme, la complémentarité entre VE et VT apparaît donc indéniable, leur hybridation (PHEV et HEV) offrant même un éventail de compromis aptes à satisfaire des usages encore très divers.

Une infrastructure adaptée, clef de l'autonomie ?

À plus long terme, le réseau électrique pourrait dénouer ce nœud gordien, dans la mesure où une infrastructure de recharge, économique et bien dimensionnée, peut rendre acceptable une autonomie plus modeste. Sur le seul terrain de la puissance de recharge, impossible de battre le VT. Remplir un réservoir de 60L en une minute à la station-service, c'est engloutir une dizaine de kWh/s, soit une puissance de 36 MW ! Les onéreuses bornes électriques dites « rapides », qui culminent à 150 kW ou plus rarement 350 kW, en sont loin. En l'état actuel de la technique, recharger en moins d'1/2h voire d'1/4h (C-Rates > 2 et 4) sollicite pourtant les batteries, au détriment de leur longévité, et implique surtout des investissements massifs hasardeux à amortir. Les recherches pour diviser par 10 le temps de recharge se heurtent donc non seulement à la thermique des cellules (C-Rate x10) mais aussi à la puissance à délivrer aux bornes (VP et poids lourds).
Le développement d'un réseau bien plus étoffé, en contrepartie d'une puissance de charge limitée, proche de 50kWh, pourrait donc constituer un compromis acceptable, catalyseur à l'adoption du VE. Et surtout l'opportunité de déployer des recharges hors domicile à des prix plus décents. Notons au passage que le prix de l'électricité domestique (0,18€/kWh environ) est analogue à celui du gazole et du SP95 (resp. 0,17 et 0,19€/kWh, à raison de 11,2 et 9,2kWh/L). C'est bien l'exceptionnel rendement du VE qui autorise lors des recharges à domicile un coût d'usage si réduit, du même facteur 3 ou 4.

La mobilité électrique, une opportunité de flexibilité énergétique !

À ce propos, faut-il s'inquiéter d'un bond de la consommation électrique à l'échelle de l'Hexagone ? Notre dernier « plein feux » (#879 de 11/2022) tirait un constat rassurant. Le parc français actuel (41M de véhicules âgés de 11 ans en moyenne) se renouvelle de manière très progressive. Aussi, l'hypothèse d'un parc électrique (BEV et PHEV) de 10Mv en 2035, et 40Mv en 2050 apparaît cohérente. Une consommation de 150 Wh/km et un kilométrage annuel de 12 000 km porteraient le besoin à 18 et 72 TWh/an en 2035 et 2050. Compatible avec la croissance de la production électrique hexagonale, proche de 532TWh en 2021, projetée à 645 TWh en 2050 sous l'effet conjugué de la croissance du renouvelable et de l'ajout de quelques tranches nucléaires.

Cerise sur le gâteau, le VE décoche même un argument massue : sa diffusion offre une belle opportunité de lisser la consommation électrique. Un soutien inespéré pour les énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et le photovoltaïque ! En effet, les batteries des VE connectés au réseau, si leur recharge est pilotée dynamiquement, peuvent jouer le rôle de variables d'ajustement et attendre le moment opportun pour déclencher leur charge. Mieux encore, les systèmes bidirectionnels (V2G) peuvent soulager ledit réseau, en restituant de l'énergie pour combler les besoins ponctuels lors des pics de charge avant de recharger en heures creuses. Un coup de pouce à RTE qui pourrait bien entendu faire l'objet d'une valorisation économique. Enfin, au terme de la vie du véhicule, la batterie peut être utilisée comme moyen de stockage stationnaire moyennant des coûts de reconditionnement limités. Autant de moyens d'améliorer le bilan ACV !

Le retour en grâce des règles élémentaires de la physique ?

Un autre levier pour concilier ACV et autonomie : la chasse aux gaspis, qui nous replonge dans l'atmosphère post chocs pétroliers. Légèreté, aérodynamique, efficience : assisterait-on enfin au retour en grâce des lois les plus élémentaires de la physique, quelque peu malmenées ces dernières années ? L'actuelle érosion du segment A, voire du segment B, jugés peu rémunérateurs, au profit d'une offre faisant la part belle aux SUV peut en faire douter de prime abord.

Mais la nature a horreur du vide. La disparition de nombreuses citadines européennes crée un appel d'air, dans lequel pourrait bien s'engouffrer une nouvelle offre, dédiée à la mobilité de proximité, urbaine ou interurbaine. La mobilité intermédiaire, micro ou mini-mobilité, constitue ainsi un terrain de jeu en plein essor. En témoigne l'effervescence régnant dans le domaine du quadricycle (léger L6e ou lourd L7e), massivement représenté au dernier Mondial, qui, outre les Citroën Ami ou Mobilize Duo, voit débouler nombre de nouveaux acteurs (Microlino, Eon Motors, XEV, Silence…). Bien aidées par les technologies du numérique, les pratiques de mobilité se réinventent, et de nouveaux services émergent, comme l'autopartage, fondés sur l'usage plutôt que sur la propriété. Gare naturellement à l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons : si elle se substitue à la marche ou à la bicyclette, cette nouvelle mobilité n'apportera aucun gain !

L'évolution des mœurs, associant covoiturage, éco-conduite et modération de l'usage, via notamment la réduction des trajets pendulaires (télétravail), aura naturellement un rôle essentiel à jouer.

Plus radicales encore dans leur obsession de frugalité, d'autres initiatives se font jour, avec pour objectif d'optimiser le rayon d'action en limitant drastiquement la masse du véhicule et la taille de la batterie. Parmi les plus marquantes, citons l'Extrême Défi impulsé par l'ADEME, terrain de jeu fertile pour son instigateur Georges Plassat et pour quelques poignées de passionnés, dont les projets souvent ultralégers (<150kg) rompent délibérément avec les codes traditionnels. Mais c'est une autre histoire, à découvrir dans un prochain dossier… ●

Des moteurs souvent friands de terres rares

Les lumières sont donc cette fois braquées sur les VE, friands de nombreuses ressources minérales, tant dans la confection des moteurs que des batteries. La plupart des moteurs synchrones à destination automobile nécessitent ainsi des aimants permanents puissants, qui utilisent les fameuses « terres rares » aujourd'hui fort médiatisées comme le néodyme, le dysprosium ou encore le terbium. Davantage que leur rareté supposée, c'est bien leur faible concentration qui rend leur exploitation énergivore, polluante, et si peu attractive que la Chine en détient en pratique le monopole (95%).

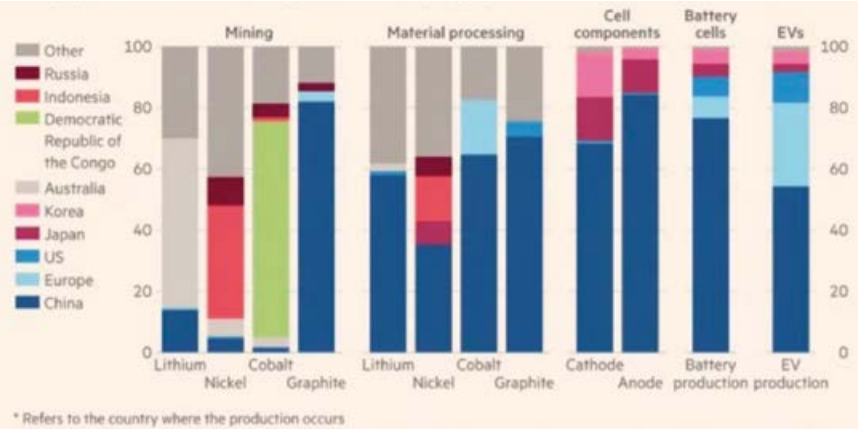
Sans recourir à la substitution d'une partie du néodyme par du lanthane ou du cérium, explorée par Toyota, certains constructeurs sont parvenus à se passer d'aimant en optant pour des moteurs synchrones à rotors bobinés. C'est notamment le cas de Renault sur la Zoe ou plus récemment de Tesla sur le moteur avant des versions intégrales. Plus encombrante et plus lourde, cette solution générant le champ magnétique via une bobine requiert en revanche un onduleur et davantage de cuivre, métal assez abondant et aisé à recycler mais de plus en plus demandé.

Des batteries très lourdes et gourmandes en ressources

De son côté, la batterie Lithium-ion, qui s'est généralisée depuis une décennie dans les châssis des véhicules électriques, réclame environ 2% en masse de lithium, soit quelques 7kg sur un véhicule de gamme intermédiaire de type Renault Zoe (50kWh) ou VW ID3 (58kWh). Un métal alcalin, principal composant de l'électrolyte, qui représente déjà 10% du coût des batteries et dont les cours s'envolent en raison de l'explosion de la demande, laquelle devrait être multipliée par 35 d'ici 2050. Cinquante nouvelles mines sont programmées, pour certaines en France, laissant augurer de l'impact d'une exploitation nécessitant de grandes quantités d'eau et parfois d'adjuvants chimiques.

Les batteries les plus répandues sur le marché, à savoir l'omniprésente NMC (Nickel, Manganèse, Cobalt) et dans une moindre mesure la chimie NCA (Nickel, Cobalt, Aluminium), utilisée notamment par Tesla, réclament également du nickel et du cobalt dans leur cathode. Si le premier est relativement abondant, 70% des quantités étant encore destinées à la fabrication d'aciers inoxydables, le second est régulièrement sous le feu des projecteurs du fait de ses conditions d'extraction, très discutables sur le plan social et environnemental.

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE GLOBAL EV BATTERY SUPPLY CHAIN (%)



Nouvelles chimies : entre parcimonie et substitution

Pour réduire cette dépendance au cobalt, qui représente autour de 4% de la masse de la batterie (entre 11 et 18kg environ), les chimistes en réduisent la proportion en substituant aux NMC 111 des chimies NMC 622 voir NMC811, parvenant parfois à limiter à 10% la proportion de ce métal. Tesla suit la même feuille de route en peaufinant des cellules de chimie NCA 811.

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse. Si leur moindre densité énergétique (-22% environ) les cantonne souvent à l'entrée de gamme, leur coût plus modéré et leur chimie exempte de cobalt et de nickel devraient leur octroyer un rôle de plus en plus central.

Plus sûres car plus stables chimiquement et moins sensible à l'emballement thermique, plus endurantes et durables car supportant davantage de cycles de charge et de décharge, elles pourraient se généraliser à court terme sur le segment B, voire les segments intermédiaires. Tesla utilise déjà des batteries LFP sans cobalt fournies par CATL et BYD sur l'entrée de gamme des Model 3 et Y, et le Losange a également fait le choix du LFP pour la future R5 électrique construite sur la plateforme CMF-B EV.

La mise en place d'une véritable économie circulaire, alimentée par des filières de recyclage plus structurées, constitue sans conteste le meilleur levier pour amé-

Omniprésentes sur le marché chinois, les batteries LFP (Lithium, Fer, Phosphate) constituent une autre alternative prometteuse.

liorer le bilan ACV du VE, tout en réduisant la dépendance géopolitique associée à la mobilité.

L'acidification atmosphérique

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des « pluies acides ». À la clef, une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation. Parmi les substances participant à ce phénomène figurent entre autres les SO_2, NOx, NH_3, HCl, HF.
Pour les VT, ce potentiel d'acidification est essentiellement lié aux émissions des raffineries (SO_2 et NOx), voire aux émissions de NOx en roulage, principalement du diesel. Toutefois, les scénarii modélisés, en France comme en Allemagne, mettent en évidence une contribution accrue du VE de 24 kWh sur cet indicateur, quel que soit le kilométrage parcouru.
À l'origine de cette flambée, figurent la production d'électricité et surtout la fabrication de la batterie. Les émissions de SO_2 pendant la phase d'extraction des métaux nécessaires à l'élaboration de la batterie sont en effet très fortes, en particulier lors des phases de production du cobalt et du nickel, employés dans les batteries NMC et NCA. Les cellules LFP dégainent encore ici un indéniable avantage environnemental.

L'ACV prend en compte d'autres aspects, telle l'augmentation de la teneur en substances acidifiantes dans la basse atmosphère, à l'origine des "pluies acides".

Potentiel d'eutrophisation de l'eau

Parmi les autres externalités considérées par l'ACV, figure également le potentiel d'eutrophisation de l'eau, qui est lui aussi lié en grande partie aux émissions de NOx. Les émissions de NOx du VE sont dues à l'extraction des nombreux métaux nécessaires à la fabrication de la batterie.
Du fait des spécificités de son cycle (hautes températures, pressions élevées, et surtout fort excès d'air), le véhicule diesel émet davantage de monoxydes et surtout de dioxydes d'azote que son homologue essence, d'où un potentiel d'eutrophisation accru. Si le VE de 24kWh présente un gain face au diesel, celui-ci est réduit face à l'essence.

Potentiel de création d'ozone photochimique

Dernier indicateur considéré, la formation d'ozone est essentiellement due aux émissions de composés organiques volatiles (COV) par les motorisations essence et diesel. Si les VE n'en émettent naturellement pas en roulage, leurs émissions globales restent supérieures à celles des VT du fait de fortes émissions en phase de production, avec une forte dispersion liée à la composition et à la durée de vie de la batterie.
Les trois derniers critères évoqués affichent donc un bilan en demi-teinte, voire largement défavorable au VE (déplétion des ressources minérales notamment), a fortiori si on double la capacité de la batterie prise en hypothèse (50 vs 24kWh).

Pollution locale et émissions à l'échappement

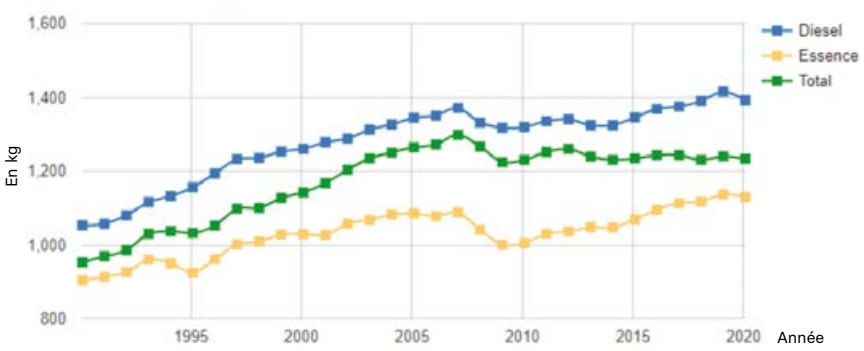
Bien qu'une ACV classique considère essentiellement des critères globaux, et ne propose donc pas de prendre en considération des impacts locaux comme la qualité de l'air, il est tentant d'intégrer les émissions locales à la réflexion. De fait, les transports routiers sont responsables d'une large part des émissions de polluants atmosphériques (54% des émissions de NOx, 14% des émissions de particules PM10 et 17% de celles de PM2,5) dont la réduction est un enjeu de santé publique. L'imminente norme Euro 7, appliquée dès juillet 2025, risque d'ailleurs d'abaisser encore les seuils.
Historiquement, les normes Euro, dont le dernier opus est l'Euro 6d, s'attaquaient uniquement aux émissions de polluants à l'échappement. Parmi ceux-ci, figurent les rejets de monoxyde de carbone CO, très toxique, qui empêchent les globules rouges de fixer l'oxygène, aujourd'hui réduits par un meilleur contrôle de la combustion. Sont également ciblés les composés organiques volatiles ou COV, et notamment les hydrocarbures imbrulés HC, tels le benzène et le toluène, réputés cancérigènes. Les catalyseurs les interceptent plutôt

efficacement, et leur subsistance en ville s'explique surtout par la multiplication de scooters à moteur 2 temps.
Les suies ou particules fines PM10 et PM2.5, émises surtout par les diesels à forte charge lors de combustions incomplètes, sont aussi scrutées de près. Le filtre à particules, apparu voici une vingtaine d'années, a certes permis de réduire le nombre de PM10 rejetées par les moteurs Diesel, mais ignore les particules les plus fines, précisément les plus susceptibles d'être aspirées dans les alvéoles pulmonaires et suspectées de favoriser le cancer du poumon.
Enfin, les oxydes d'azotes ou NOx évoqués précédemment, qui se forment à la combustion en excès d'air, concernent traditionnellement les diesels, mais aussi les derniers moteurs essence à injection directe. Si les constructeurs disposent depuis une dizaine d'année de dispositifs de réduction catalytique sélective SCR ou de filtres NOx Trap, le lecteur notera au passage que les latitudes d'action parfois (trop) savamment calculées de ces dispositifs ont été à l'origine du retentissant « Dieselgate ». Et par conséquent, du tropisme pro-électrique du législateur…

Les émissions hors échappement dans le collimateur ?

On l'a compris, le véhicule électrique sort à priori gagnant de cette dernière confrontation. Mais une nouvelle fois, la réalité se garde bien d'être simple. En effet, les efforts consacrès à la réduction des émissions ont porté leurs fruits, si bien que les études montrent qu'une large moitié des particules générées par le trafic routier en Europe ne proviennent plus de l'échappement. D'où viennent alors ces particules ? Selon le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne, les particules émises par les freins, les pneumatiques ou la chaussée sont devenues largement prépondérantes. Dans le détail, les freins (16 à 55% des PM10 selon les conditions de circulation), le contact pneu / chaussée (5 à 30 %) et la remise en suspension des particules (28 à 59%) se partagent le podium.
Dans l'Hexagone, la part du facteur abrasion a ainsi bondi de manière spectaculaire entre 1990 et 2019, passant de 15% à 59% pour les PM10, et de 9 à 45% pour les PM2,5. Si la généralisation du filtre à particules sur les véhicules diesel participe largement à ce résultat, l'impact de l'inflation pondérale des véhicules ne doit pas être sous-estimée. L'électrification du marché, qui s'accompagne non seulement

ÉVOLUTION DE LA MASSE MOYENNE - VÉHICULES PARTICULIERS VENDUS EN FRANCE

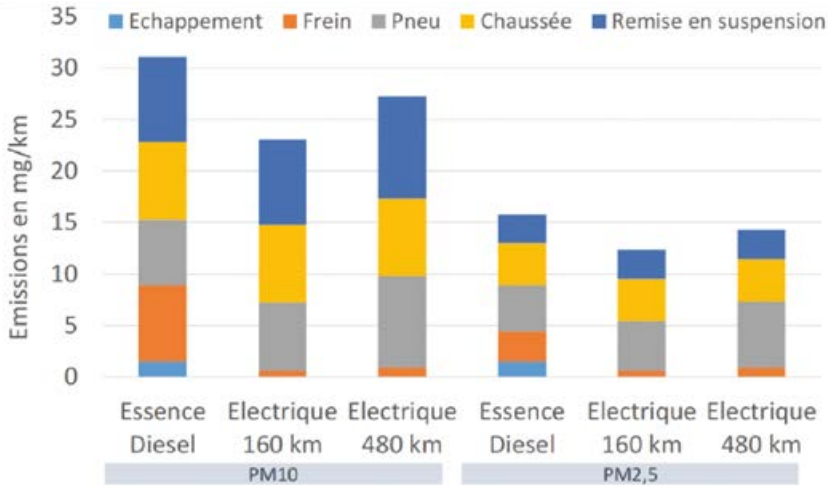


Source : carlabelling.ademe.fr/cfiffrescles2022

d'un alourdissement de l'ordre de 25% à silhouette équivalente, mais aussi d'une éviction des véhicules citadins (segment A voire B) au profit de SUV plus massifs et rémunérateurs permettant d'amortir les coûteuses batteries, semble malheureusement accélérer la tendance.

Freins, pneumatiques et revêtements routiers

Manifestement conscient que ce mouvement de fond est appelé à s'accentuer, le législateur semble bien décidé à examiner de plus près les émissions hors échappement. Encore en débat, l'imminente norme Euro 7 pourrait bien imposer un seuil d'émission de particules de freins, sinon de pneumatiques.
Quelles conséquences pour notre comparatif entre VE et VT ? Grâce au freinage régénératif, les VE ont le potentiel d'émettre moins de particules issues du système de freinage que les VT (respectivement 3 et 25% des PM10). En revanche, leur masse supérieure d'un quart influence la largeur des pneus et donc à la fois les émissions de particules pneus / chaussée (61 et 47%



des PM10) et les remises en suspension (36 et 28% des PHE PM10).
Par conséquent, les études récentes ne permettent plus d'établir un écart significatif d'émissions totales de particules entre le véhicule électrique et le véhicule thermique neuf, lequel n'émet presque plus de particules à l'échappement. Accordons toutefois au VE l'avantage de ne pas émettre de COV, lesquels peuvent contribuer à la formation de particules secondaires, et de n'être pas suspect d'un vieillissement aléatoire des dispositifs de traitement à l'échappement.

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.

Bilan de la confrontation : une victoire conditionnelle !

Améliorer le bilan ACV de la mobilité requiert naturellement une approche globale, tant celui-ci est le produit d'une chaîne complexe. Cet objectif implique donc de modérer la demande, de cibler les modes de transport les plus efficients, d'agir sur leur taux d'occupation, de favoriser les énergies les moins carbonées, et enfin de travailler sur l'efficacité du véhicule.
Au terme de cette étude, qui s'intéresse particulièrement à ce dernier maillon, il apparaît clairement que départager les deux modes de propulsion est bien plus complexe encore qu'anticipé. Si le bilan du véhicule thermique est assez prévisible, celui du VE est bien plus dispersé, sensible à de multiples paramètres comme la taille de la batterie, sa nature chimique, le mix énergétique qui a permis de la produire, le bouquet électrique qui permettra de la recharger, et enfin sa longévité.
Il en résulte une situation paradoxale : en l'état actuel de la technique, le VE peut être le meilleur ou le pire des choix sur le plan environnemental. Sans grande surprise, un opulent VE visant à rapprocher son autonomie du thermique en misant sur la généreuse capacité (80 kWh, 100 kWh voire davantage) d'une lourde batterie (>500kg) produite dans un pays à l'énergie fortement carbonée, partira avec un handicap ACV pratiquement irrattrapable, sauf à rouler très longtemps (>300 000km) dans une région au mix vraiment peu carboné.

Le dilemme du VE

En creux, il est aisé d'identifier des leviers d'action efficaces pour améliorer le bilan ACV du véhicule électrique ! Un VE léger et sobre, alimenté par une batterie dimensionnée au plus juste, fabriqué et circulant dans une région au mix décarboné, et surtout utilisé de manière à prolonger au maximum sa durée de vie, pourra prétendre à un bilan bien plus favorable que celui du VT équivalent, au prix toutefois d'un rayon d'action quotidien drastiquement réduit.
Ici git le lièvre : trop dégrader l'autonomie plombe la polyvalence, alors fort éloignée de l'équivalent thermique ! En l'attente d'une hypothétique rupture technologique, le VE est-il pour autant condamné à sacrifier sa polyvalence sur l'autel du bilan ACV ? Ou inversement à s'affubler d'une batterie pesante et dispendieuse en espérant rivaliser avec l'autonomie du VT ? Terrible dilemme, qui pose la question de l'usage et de l'infrastructure. À court terme, la complémentarité entre VE et VT apparaît donc indéniable, leur hybridation (PHEV et HEV) offrant même un éventail de compromis aptes à satisfaire des usages encore très divers.

Une infrastructure adaptée, clef de l'autonomie ?

À plus long terme, le réseau électrique pourrait dénouer ce nœud gordien, dans la mesure où une infrastructure de recharge, économique et bien dimensionnée, peut rendre acceptable une autonomie plus modeste. Sur le seul terrain de la puissance de recharge, impossible de battre le VT. Remplir un réservoir de 60L en une minute à la station-service, c'est engloutir une dizaine de kWh/s, soit une puissance de 36 MW ! Les onéreuses bornes électriques dites « rapides », qui culminent à 150 kW ou plus rarement 350 kW, en sont loin. En l'état actuel de la technique, recharger en moins d'1/2h voire d'1/4h (C-Rates > 2 et 4) sollicite pourtant les batteries, au détriment de leur longévité, et implique surtout des investissements massifs hasardeux à amortir. Les recherches pour diviser par 10 le temps de recharge se heurtent donc non seulement à la thermique des cellules (C-Rate x10) mais aussi à la puissance à délivrer aux bornes (VP et poids lourds).
Le développement d'un réseau bien plus étoffé, en contrepartie d'une puissance de charge limitée, proche de 50kWh, pourrait donc constituer un compromis acceptable, catalyseur à l'adoption du VE. Et surtout l'opportunité de déployer des recharges hors domicile à des prix plus décents. Notons au passage que le prix de l'électricité domestique (0,18€/kWh environ) est analogue à celui du gazole et du SP95 (resp. 0,17 et 0,19€/kWh, à raison de 11,2 et 9,2kWh/L). C'est bien l'exceptionnel rendement du VE qui autorise lors des recharges à domicile un coût d'usage si réduit, du même facteur 3 ou 4.

La mobilité électrique, une opportunité de flexibilité énergétique !

À ce propos, faut-il s'inquiéter d'un bond de la consommation électrique à l'échelle de l'Hexagone ? Notre dernier « plein feux » (#879 de 11/2022) tirait un constat rassurant. Le parc français actuel (41M de véhicules âgés de 11 ans en moyenne) se renouvelle de manière très progressive. Aussi, l'hypothèse d'un parc électrique (BEV et PHEV) de 10Mv en 2035, et 40Mv en 2050 apparaît cohérente. Une consommation de 150 Wh/km et un kilométrage annuel de 12 000 km porteraient le besoin à 18 et 72 TWh/an en 2035 et 2050. Compatible avec la croissance de la production électrique hexagonale, proche de 532TWh en 2021, projetée à 645 TWh en 2050 sous l'effet conjugué de la croissance du renouvelable et de l'ajout de quelques tranches nucléaires.

Cerise sur le gâteau, le VE décoche même un argument massue : sa diffusion offre une belle opportunité de lisser la consommation électrique. Un soutien inespéré pour les énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et le photovoltaïque ! En effet, les batteries des VE connectés au réseau, si leur recharge est pilotée dynamiquement, peuvent jouer le rôle de variables d'ajustement et attendre le moment opportun pour déclencher leur charge. Mieux encore, les systèmes bidirectionnels (V2G) peuvent soulager ledit réseau, en restituant de l'énergie pour combler les besoins ponctuels lors des pics de charge avant de recharger en heures creuses. Un coup de pouce à RTE qui pourrait bien entendu faire l'objet d'une valorisation économique. Enfin, au terme de la vie du véhicule, la batterie peut être utilisée comme moyen de stockage stationnaire moyennant des coûts de reconditionnement limités. Autant de moyens d'améliorer le bilan ACV !

Le retour en grâce des règles élémentaires de la physique ?

Un autre levier pour concilier ACV et autonomie : la chasse aux gaspis, qui nous replonge dans l'atmosphère post chocs pétroliers. Légèreté, aérodynamique, efficience : assisterait-on enfin au retour en grâce des lois les plus élémentaires de la physique, quelque peu malmenées ces dernières années ? L'actuelle érosion du segment A, voire du segment B, jugés peu rémunérateurs, au profit d'une offre faisant la part belle aux SUV peut en faire douter de prime abord.

Mais la nature a horreur du vide. La disparition de nombreuses citadines européennes crée un appel d'air, dans lequel pourrait bien s'engouffrer une nouvelle offre, dédiée à la mobilité de proximité, urbaine ou interurbaine. La mobilité intermédiaire, micro ou mini-mobilité, constitue ainsi un terrain de jeu en plein essor. En témoigne l'effervescence régnant dans le domaine du quadricycle (léger L6e ou lourd L7e), massivement représenté au dernier Mondial, qui, outre les Citroën Ami ou Mobilize Duo, voit débouler nombre de nouveaux acteurs (Microlino, Eon Motors, XEV, Silence…). Bien aidées par les technologies du numérique, les pratiques de mobilité se réinventent, et de nouveaux services émergent, comme l'autopartage, fondés sur l'usage plutôt que sur la propriété. Gare naturellement à l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons : si elle se substitue à la marche ou à la bicyclette, cette nouvelle mobilité n'apportera aucun gain !

L'évolution des mœurs, associant covoiturage, éco-conduite et modération de l'usage, via notamment la réduction des trajets pendulaires (télétravail), aura naturellement un rôle essentiel à jouer.

Plus radicales encore dans leur obsession de frugalité, d'autres initiatives se font jour, avec pour objectif d'optimiser le rayon d'action en limitant drastiquement la masse du véhicule et la taille de la batterie. Parmi les plus marquantes, citons l'Extrême Défi impulsé par l'ADEME, terrain de jeu fertile pour son instigateur Georges Plassat et pour quelques poignées de passionnés, dont les projets souvent ultralégers (<150kg) rompent délibérément avec les codes traditionnels. Mais c'est une autre histoire, à découvrir dans un prochain dossier… ●