

Parole d'Experts



Le numérique frugal au service de la décarbonation



Une publication du Groupe de Travail
« **Décarbonation & Numérique Frugal** »
de Systematic

Chapitre 1 : Le constat

Croissance de l'usage du numérique & envol des émissions de GES

Chapitre 2 : Le paradoxe

Adopter les technologies numériques pour réduire les émissions de GES

Chapitre 3 : L'impératif

Faire évoluer rapidement les pratiques

Hors série mois d'août : Spécial électro-mobilité

L'innovation n'est pas un long fleuve tranquille ! Zoom sur la voiture électrique...

Chapitre 4 : L'urgent

Créer localement de nouvelles activités nativement décarbonées

Chapitre 5 : L'indispensable

Stimuler et soutenir le développement des solutions logicielles

Parole d'Experts



Systematic Paris Région s'est donné comme objectif de contribuer à la stratégie mondiale de décarbonation définie par l'Accord de Paris et d'aider les entreprises à s'inscrire dans une trajectoire conforme aux choix européens de NetZero en 2050.

Le groupe de travail Décarbonation & Numérique Frugal que nous avons créé en 2023, transversal aux hubs et enjeux, a l'ambition de documenter la place de la filière numérique, aussi bien dans la production d'outils et de services que dans les usages dans la production d'émission de gaz à effet de serre

Notre intuition est que le bilan global entre, d'une part, les émissions de gaz à effet de serre (GES) induits par la production et l'usage des outils numériques et, d'autre part, la réduction des activités génératrices de GES grâce à l'utilisation des outils numériques devrait être positif. Le numérique peut déjà permettre d'optimiser des activités impliquant l'usage d'énergies émettrices de CO2, comme le transport ou l'agriculture, ou permettre la mesure et le contrôle de toutes les sources d'émissions de GES afin d'en permettre des optimisations ultérieures. Notre objectif est de démontrer la pertinence de cette approche et de fournir les éléments de méthode permettant à chaque entreprise comme à chaque particulier, de contribuer par un usage maîtrisé des moyens numériques à la baisse maîtrisée des émissions de GES.

A cette fin, nous avons collecté, à travers des sources fiables d'information, les résultats scientifiques comme les bonnes pratiques. Nous avons conscience que ce travail est inachevé, mais les enjeux considérables de la décarbonation, comme la nécessité d'une contribution étayée au débat public, nous ont incité à publier nos travaux en l'état de nos connaissances en fin 2024.

Il ne reste que 26 ans pour atteindre le Net Zero. Chaque instant, chaque geste comptent alors que chaque année la planète dépasse les records de chaleur et de perturbations climatiques de l'année précédente.

La planète brûle. Le groupe de travail Décarbonation & Numérique Frugal ne veut pas regarder ailleurs mais agir, maintenant, avec les outils les mieux appropriés.

Pour commencer, il partage aujourd'hui avec vous son analyse de la situation et sa vision pragmatique et déterminée des pratiques à changer ainsi que des solutions à mettre en place pour inverser la tendance. Parce que oui, c'est encore possible !

Nous vous souhaitons une bonne lecture et vous invitons à nous rejoindre !

Le groupe de travail Décarbonation & Numérique Frugal de Systematic

NB : Systematic est déjà un acteur engagé dans la décarbonation des activités du numérique via la mise à disposition des acteurs économiques et collectivités d'une [cartographie de solutions liées à l'enjeu de la décarbonation et d'un numérique plus frugal](#)

Hors série mois d'août : Spécial électro-mobilité

Zoom sur la voiture électrique, une solution séduisante de décarbonation des transports

par Jean-Pierre Corniou, CEO, Agile-IT & Président de l'Enjeu Industrie & Services, Systematic
et Marc Alochet, Chercheur en sciences de gestion, Ecole Polytechnique

S'il est aujourd'hui un domaine où les enjeux de la décarbonation sont majeurs, c'est bien celui de la mobilité individuelle. En effet, **les motorisations thermiques sont à l'origine du tiers des émissions de CO₂ mondiales, dont la moitié imputable aux véhicules légers**. Plus encore, **120 ans de géopolitique du pétrole ont montré les effets déstabilisants de l'exploitation de cette manne par les pays qui en sont naturellement pourvus**.

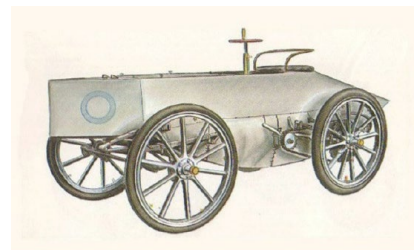
Dans le monde ferroviaire, l'électricité a depuis longtemps fait disparaître les locomotives à vapeur, partout dans le monde, mais le moteur à explosion, dont les performances sont à l'origine de 130 ans de succès continu, persiste à dominer largement le monde de l'automobile et du transport routier. **Le changement de source d'énergie pour éviter les effets négatifs de la combustion d'un carburant fossile, n'est pas une réflexion récente. Mais les pressions s'accroissent et les capacités techniques ont progressé depuis vingt ans rendant l'alternative électrique possible à grande échelle**. Elle est également souhaitable dans un processus vertueux d'électrification des usages.

1- Le choix de la motorisation, un développement parallèle à celui de l'automobile

À l'aube du XXe siècle, trois types de motorisations s'affrontaient : la machine à vapeur, en déclin ; **le moteur à explosion et le moteur électrique, qui suscitaient tous deux beaucoup d'espoir**.

a) Les premiers succès de l'électrique... et les désillusions

Un opiniâtre créateur, Charles Jeantaud, participe en 1895 et 1898, sans succès, à deux courses Paris-Bordeaux avec son véhicule électrique à traction avant. Il produit finalement un véhicule électrique, **la Duc, qui bat le premier record de vitesse à 63,15 km/h en décembre 1898**.



La Jeantaud Duc
© Caradisiac

Parole d'Experts

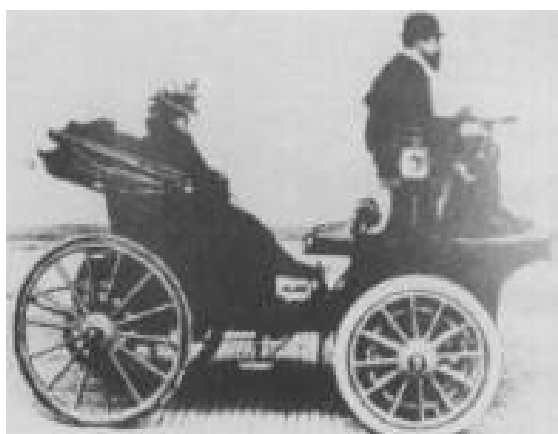


Ce record sera battu par un autre véhicule électrique devenu célèbre, **la Jamais Contente, de Camille Jenatzy**, ingénieur réputé et pilote de grand talent, **qui dépasse les 105 km/h le 29 avril 1899.**

En 1897, la **Compagnie Parisienne des Voitures Electriques Système Krieger** est lancée. Le succès du fiacre électrique Krieger, réservé au service urbain, est en revanche plus durable.



La Jamais Contente
© Château de Compiègne



Un fiacre Krieger
© Kartelec.com

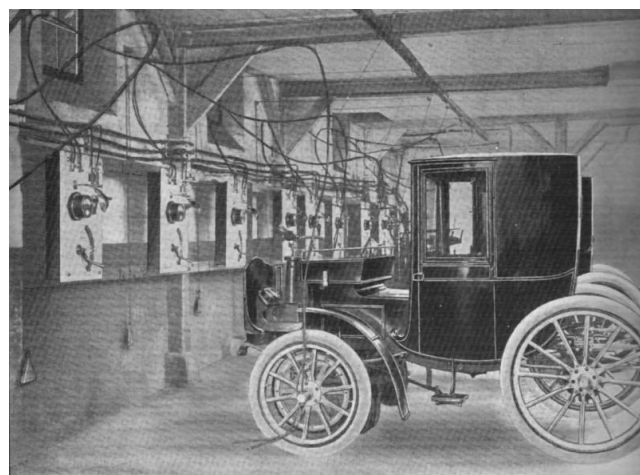
Il apparaît à l'époque indispensable de débarrasser les villes, en forte croissance, modernisées et aérées, des chevaux qui les encombre et les polluent pour les remplacer par un véhicule propre et non bruyant. L'électricité naissante est tout de suite reconnue pour ses qualités de silence et d'absence d'émissions.

Louis Krieger dote son fiacre électrique de deux moteurs agissant en parallèle sur les roues avant, solution qui préfigure la traction avant. 400 fiacres électriques seront vendus. Leur autonomie était de 90 km.

Krieger produit également une petite voiture, **l'Electrolette**, qui, en 1900 parcourt 152 kilomètres sans recharger les batteries de sa voiture, ce qui est une performance remarquable.

Une première entreprise est créée en 1898, dédiée à la production de masse des fiacres électriques : la **Compagnie Française des Voitures Electromobiles**. Elle installe également dans Paris, rue Cardinet, **une station de recharge capable de traiter 40 véhicules à la fois.**

L'année suivante, la puissante **Compagnie Générale des Voitures**, qui dispose d'une cavalerie de quelque 12 000 chevaux, franchit le pas de la mécanisation. Elle lance ses premiers fiacres électriques dans Paris, après avoir assuré la reconversion de ses cochers en chauffeurs dans une école créée dans ce but à Aubervilliers (93).



Station de recharge de batteries (Paris - 1898)
© Daniel Depris

Parole d'Experts



« *La voiture électrique est sans contredit la voiture automobile idéale, en ce qui concerne la facilité de mise en route et de manœuvre, la propreté, l'élégance, la sûreté de marche, l'absence de bruit, de trépidation et d'odeur. Nul autre système ne peut actuellement lui être comparé comme voiture de ville ou de promenade* », affirme en 1901 la revue scientifique La Nature.

Mais, malgré l'ensemble de leurs qualités, les véhicules électriques souffrent d'une autonomie trop faible qui a **rapidement limité leur utilisation à des marchés urbains de niche** tels que des transports de courte distance (fiacres ou bus électrifiés) ou des usages spécifiques (livraison de lait, ramassage des ordures).

En effet, si la technique du moteur électrique fut assez rapidement maîtrisée, **le problème du stockage de l'électricité embarquée dans le véhicule perdura et les accumulateurs au plomb pénalisaient le poids total du véhicule** et limitaient ses performances.

Parce que personne n'avait trouvé de solution performante de stockage, l'électricité fut très rapidement abandonnée dès le début de l'histoire de l'automobile au profit du pétrole et du moteur à explosion dont les avantages techniques et économiques étaient apparus décisifs.

Après la seconde guerre mondiale, la cause paraît entendue. Dans un article de 1955, l'historien américain John B. Rae propose une explication déterministe à l'échec de l'automobile électrique : celle-ci ne serait victime que de ses défauts intrinsèques en comparaison des avantages de la technologie des voitures à essence et il était inéluctable que ces dernières s'imposent. Il affirme même que le développement de l'automobile électrique du début du siècle était « *une excroissance parasite de l'industrie automobile, et que sa disparition ne fut regrettée que par ceux qui avaient eu la malencontreuse idée d'y investir leur argent* ».

b. De nouvelles tentatives, toujours aussi infructueuses

En 1970, EDF, avait lancé un programme de recherche portant sur **le test de plusieurs véhicules légers électrifiés, dont des Renault R4 et R5**.

Un véhicule, le **CGE Grégoire**, sera même commercialisé. Avec une vitesse de 75 km/h, il avait une centaine de kilomètres d'autonomie. Ce fut un échec commercial.

En 1990 fut lancé le **Programme de recherches et d'innovation dans les transports terrestres (Predit)**, dont l'objectif était l'exploration des conditions de production d'un véhicule électrique de série.

Un **fonds de soutien aux véhicules électriques fut créé en 1991** et, en 1993, le ministère de l'Industrie lança un appel d'offres : **22 villes françaises ont été choisies comme pilotes**, et des bornes de recharge y sont installées par EDF.



Le CGE Grégoire (1971)

© Lautomobileancienne.com

Parole d'Experts



Ce programme a permis de tester des véhicules, **dont les concept-cars Citela de Citroën et Zoom de Renault**, et des équipements de recharge.

Fin 1996, **3,475 véhicules électriques** (Citroën AX, Saxo, Berlingo, Peugeot 106, Renault Clio, Twingo et Express) circulaient en France.

C'est néanmoins en Californie que les ambitions furent les plus fortes avec **le programme ZEV, Zero Emission Vehicle** (i.e., aucune émission de polluants ou de gaz à effet de serre due au fonctionnement du moteur), qui avait pour objectif d'imposer aux constructeurs d'atteindre annuellement des pourcentages de la vente de véhicules de ce type.

C'est pour répondre à cet objectif, que le véhicule électrique le plus abouti jusqu'alors, **l'EV1, avait été proposé par General Motors. GM produisit 1117 voitures entre 1996 et 1999 et en mit en location 800.**

En 2001, GM a mis fin à ce programme, en dépit de la satisfaction des utilisateurs, s'estimant **incapable de produire industriellement ces véhicules dans des conditions économiques satisfaisantes**. GM perdait 80000 \$ par véhicule.

D'ailleurs, suite à ce constat partagé par l'ensemble des constructeurs et le législateur, **le programme ZEV fut mis en pause par l'état de Californie** pour être relancé sous une autre forme au début des années 2020.



La GM EV1

© GM Media Archives

Pendant ces trente dernières années du XX^{ème} siècle, toutes les tentatives de redémarrage industriel se sont heurtées à **la triple question du prix, du poids et du manque d'autonomie des batteries**. On a ainsi exploré les possibilités des batteries nickel cadmium, NiCd, qui avaient une longue durée de vie mais nécessitait une maintenance rigoureuse (le cadmium est toxique pour l'homme). Ce sont ces batteries, fabriquées en France par Saft, qui ont alimenté les véhicules électriques français de l'expérimentation 1995-2005.

Là encore, la cause paraissait entendue et le chercheur français Frédéric Fréry avait déclaré, dans une conférence de management stratégique à Montpellier en 2000, que la voiture électrique est un cas emblématique d'une « **amnésie stratégique** ».

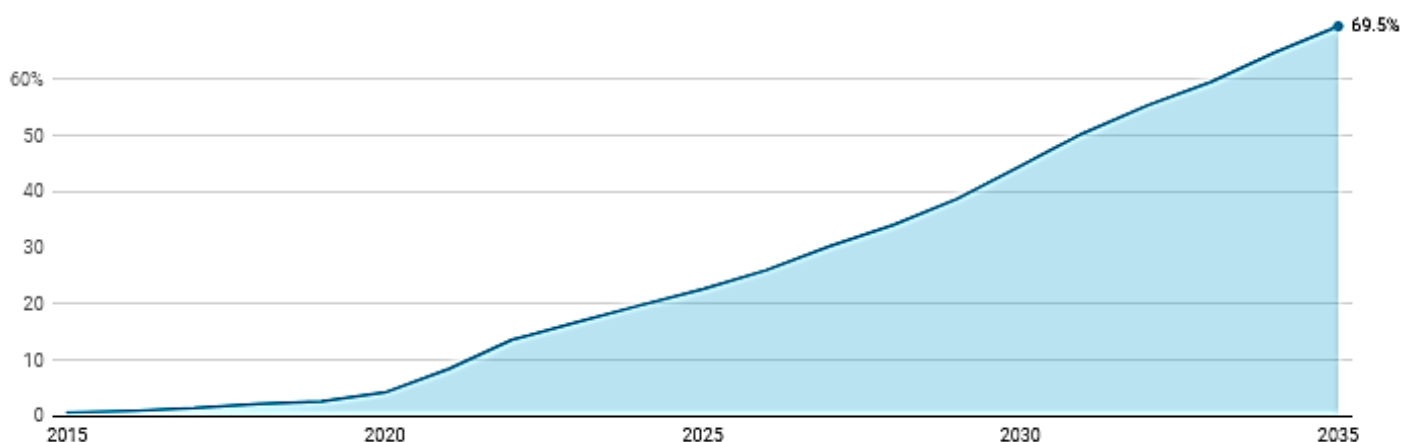
c. XXI^{ème} siècle : démarrage fulgurant des ventes

En 2017, les ventes de véhicules électriques rechargeables (véhicules électriques à batterie et hybrides rechargeables) ont franchi le seuil de 1% du marché, et **c'est à partir de 2020 que la croissance s'est fortement accélérée pour atteindre environ 20% du marché mondial en 2024 avec une prédiction d'environ 70% en 2035.**

Parole d'Experts



Vente de véhicules électriques rechargeables 2015 – 2023 et prévisions 2024 - 2035



Source : <https://ev-volumes.com/news/ev/are-global-ev-sales-forecast-to-improve-by-the-end-of-2024/>

Plusieurs transformations ont renouvelé l'intérêt du véhicule électrique depuis le début du XXIe siècle.

Dès les premières tentatives, l'attention des constructeurs s'était concentrée sur **le maillon faible, la batterie**. Le développement de l'électronique grand public a conduit l'industrie à **améliorer les technologies de batteries en démontrant sa capacité à produire en masse la batterie lithium-ion liquide (Li-Ion)**, qui s'est révélée appropriée à la fourniture de la capacité énergétique requise pour un véhicule automobile grâce à une densité énergétique de 150 Wh/kg (et de 250 à 350 Wh/kg en 2025 pour atteindre 300 à 400 Wh/kg en 2030 suivant le type de cellule utilisé)¹.

La levée de ce verrou technologique, bloquant jusqu'alors, a servi de déclencheur, mais l'essor que nous constatons doit aussi beaucoup à deux autres événements :

- D'une part, **la vision systémique qui a été portée par Tesla**. Le constructeur américain ne s'est pas contenté de mettre sur le marché des véhicules attrayants qui cassaient l'image de « sous voiture » associée au VE, il a aussi développé son réseau privé de chargeurs, ce qui a permis de libérer les conducteurs du risque de la panne de carburant.
- D'autre part, **les gouvernements et les élus des grandes villes sont confrontés à un problème redoutable qui soulève partout beaucoup de passion**. Ils ont pris conscience que **l'automobile à moteur thermique, en usage individuel privatif, était le moyen de transport de masse le plus mal adapté à la ville**. Les émissions - gaz toxiques, comme le Nox, et particules de combustion - qu'elles génèrent, à faible vitesse et dans un milieu confiné dégradent la qualité de l'air urbain.

¹ - Evolution des densités d'énergie des cellules en fonction de leur format et du type de cathode utilisée (voir annexe)

Parole d'Experts



Les émissions de gaz à effet de serre, comme le CO₂, sont identifiées comme le premier vecteur de réchauffement climatique. Le rôle des transports dans les pollutions toxiques est régulièrement condamné par l'OMS. Dans les villes des pays européens à revenu élevé, il a été prouvé que la pollution de l'air diminue l'espérance de vie moyenne de 2 à 24 mois, en fonction des niveaux de pollution. La situation est infiniment plus catastrophique dans les mégapoles d'Afrique, d'Asie ou d'Amérique latine.

Ainsi, **globalement, toutes les grandes villes mondiales cherchent à réduire le nombre de voitures, à développer l'usage des transports en commun électrique et à limiter la circulation des voitures individuelles aux seules voitures non polluantes, et dans des modèles d'autopartage.** Ce bouquet de mesures est mis en œuvre partout dans le monde avec plus ou moins de volontarisme, en fonction des moyens financiers et de la capacité de la population à s'adapter à cette nouvelle donne, toujours perçue comme une limitation des libertés individuelles.

2 - Les vertus du véhicule électrique

La voie du tout électrique est engageante car elle résout beaucoup de problèmes historiques du véhicule à moteur thermique. La simplification des véhicules est draconienne, car l'absence de combustion d'hydrocarbures dans le véhicule supprime toutes les contraintes techniques et d'architecture que cela implique. Véhicule allégé de son usine thermique embarquée, vif à conduire, car disposant immédiatement de toute la puissance, totalement silencieux, sans émission à l'usage, avec un « plein électrique » de quelques euros, permettant des innovations de structure et de carrosserie, la voiture électrique est séduisante et offre un nouvel art de conduire.

Mais l'obstacle majeur à l'essor du véhicule électrique était jusqu'alors son industrialisation de masse dans des conditions de coût accessibles à la majorité des clients. Il est en effet indispensable que l'industrie automobile se réinvente et elle ne l'a pas fait spontanément. Les écueils techniques et financiers sont en effet nombreux et il fallu le volontarisme des pouvoirs publics pour que la pertinence de cette solution émerge dans le débat public et conduise à des décisions majeures, comme l'obligation européenne de vendre 100% de véhicules neufs zéro émission de CO₂ à partir de 2035.

Mais, plus encore, **c'est le choix de la Chine de faire du véhicule électrique le fer de lance de sa conquête mondiale qui a achevé de démontrer la faisabilité d'une production de masse de véhicules électriques. La spécificité du véhicule électrique va au-delà de l'aspect énergétique : c'est la totalité de la chaîne de valeur automobile qui est remise en cause.** La simplification du véhicule et l'allègement considérable de la mécanique, limitée à la base roulante, renforcent le rôle de la conception, du choix des matériaux et de l'électronique embarquée qui transforme la gestion interne du véhicule et facilite les échanges entre le véhicule et son environnement. Il commence à être envisageable de proposer des modèles qui tirent parti des libertés de conception que permet, pour la première fois, la remise en cause de l'architecture des véhicules arrêtée au début du XXe siècle. C'est une évolution douloureuse pour l'industrie européenne, très suspicieuse quant au respect de son indépendance de choix des solutions techniques pour se conformer aux objectifs fixés par les pouvoirs publics.

Parole d'Experts



Le véhicule électrique souffre encore dans l'opinion d'un déficit de crédibilité dans le cœur de sa raison d'être, la légitimité environnementale. Si les conséquences de la combustion de hydrocarbures dans les moteurs thermiques dans la contribution à l'effet de serre et dans les toxicités multiples sont désormais prouvés, si le caractère polluant de l'exploitation pétrolière ne fait pas de doute, il reste que l'innocuité environnementale du véhicule électrique est encore sujet de multiples questions dans l'opinion et parmi les décideurs politiques. Les enjeux politiques et économiques de la réduction de l'usage du pétrole sont considérables et impliquent une totale clarté.

Pour que le véhicule électrique efface tout soupçon, **il faut démontrer que le cycle de vie d'un véhicule électrique est plus vertueux que celui d'un véhicule thermique, « from cradle to grave », du berceau jusqu'à la tombe selon l'expression consacrée.** Un véhicule électrique doit être fabriqué avec, pour la chaîne cinématique, des composants différents de son homologue thermique. La différence porte sur le réservoir d'énergie – la batterie- et sur l'organe de mouvement, le moteur. Les autres composants sont semblables.

La principale critique porte sur l'utilisation de lithium, de nickel, de cobalt et de manganèse pour la fabrication de la batterie et l'emploi de néodyme, une terre rare, pour les aimants permanents du moteur électrique. La production de ces matériaux nécessite l'utilisation de moyens d'exploitation minière consommateurs d'énergie et se fait, dans certains pays, dans des conditions totalement irrespectueuses des règles internationales.

Une fois produit, le véhicule électrique va utiliser de l'électricité pour laquelle le mix énergétique est largement différent selon les pays. **Quand l'électricité est décarbonée, l'usage d'électricité est totalement vertueux en termes d'émission de CO₂ et permet de s'imposer définitivement vis-à-vis du véhicule thermique.** C'est ainsi le cas de la Norvège, où les voitures électriques représentent 30% du parc et plus de 95% des immatriculations.

Il faut donc analyser toute la chaîne de production et d'usage du véhicule électrique et le comparer avec son équivalent thermique pour disposer d'une vision rigoureuse. Les études sont nombreuses. **On peut considérer qu'il y a consensus² pour estimer que dans les conditions de production actuelles, une voiture électrique va produire 83 gCO₂e/km à la production contre 40 gCO₂e/km pour un véhicule thermique. En revanche, en France, elle va émettre 60 gCO₂e/kWh contre 200 gCO₂e/km pour une voiture essence.** Les émissions supplémentaires à la production sont compensées entre 30 000 et 50 000 kilomètres³. Il faut souligner que le rendement énergétique d'un véhicule électrique est 3 à 4 fois supérieur à celui d'un moteur thermique.

3 – Une économie circulaire forte pour améliorer la soutenabilité économique et écologique des véhicules électriques

Le déploiement d'une **économie circulaire forte, fondée sur des principes de sobriété et d'allongement de la durée de vie des produits et des infrastructures**, viendrait réduire encore plus les bilans CO₂, consommation en ressources et énergie des véhicules électriques. En effet, avec près de 20 millions de véhicules électriques prévus en circulation dans le monde d'ici 2025 et le seuil des 100 millions passé vraisemblablement avant 2030, il est **crucial d'agir sur le cycle de vie complet, « from cradle to grave », des véhicules et, plus particulièrement sur celui des batteries**, pour augmenter encore plus la contribution des VE à une économie plus soutenable.

² - Etude bpifrance, publiée par Big Media, 2 mai 2024

³ - Etude carbone 4, 24 juin 2025

Parole d'Experts



Le déploiement d'une économie circulaire forte⁴, fondée sur des **principes de sobriété et d'allongement de la durée de vie des produits et des infrastructures**, viendrait réduire encore plus les bilans CO2, consommation en ressources et énergie des véhicules électriques.

En effet, avec près de 20 millions de véhicules électriques prévus en circulation dans le monde d'ici 2025 et le seuil des 100 millions passé vraisemblablement avant 2030, **il est crucial d'agir sur le cycle de vie complet (from cradle to grave) des véhicules et, plus particulièrement sur celui des batteries**, pour augmenter encore plus la contribution des véhicules électriques à une économie plus soutenable.

a. Une proposition de processus d'EC pour les batteries

De manière synthétique, nous proposons ici quelques étapes clefs de ce que pourrait être une économie circulaire forte pour les batteries :

- **Une éco-conception du produit** minimisant l'usage des matériaux et favorisant leur réparabilité et leur recyclabilité. L'éco-conception doit aussi agir sur les procédés de fabrication des cellules qui sont très consommateurs en énergie
- **Un diagnostic en usage** permettant d'en optimiser l'utilisation et de détecter lorsqu'elle n'est plus apte à un usage automobile⁵
- **Un diagnostic batterie dans et hors véhicule** permettant de détecter lorsqu'elle n'est plus apte à un usage automobile mais aussi d'identifier les composants défectueux et d'évaluer la capacité à intervenir pour la remettre en état
- **La réparation** via le remplacement de composants électromécaniques défectueux voire de modules
- **Le remanufacturing** permettant de remettre en état neuf une batterie dont l'état le permet (cf. importance du diagnostic mentionné au-dessus)
- **L'utilisation en seconde vie** lorsqu'elle son état de santé, bien que plus compatible avec un usage automobile, permet d'autres utilisations telles que, par exemple, le stockage stationnaire d'énergie
- Enfin, lorsque la batterie est totalement hors d'usage ou accidentée, **son recyclage qui permet de récupérer les matériaux critiques pour une réutilisation ultérieure.**

b. Le recyclage des batteries

Dans notre description du cycle de vie d'une batterie, nous avons fait apparaître **le recyclage comme étant la dernière étape du processus mais le recyclage a une importance cruciale dans le processus de fabrication des batteries et le modèle d'affaire des producteurs** de celles-ci.

⁴ - F. Aggeri, professeur de management au CGS-i3 de Mines Paris – PSL, a introduit le concept d'économie circulaire forte qu'il oppose au concept d'économie circulaire faible qui ne change par le modèle d'affaires des entreprises et utilise principalement les leviers d'optimisation de l'utilisation des matériaux voire de leur recyclage en fin de vie (<https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/industrie/leconomie-circulaire-une-utopie-rationnelle/>)

⁵ - Voir, par exemple, les solutions proposées par la start-up Française Bib batteries (<https://bib-batteries.fr/fr>)

Parole d'Experts



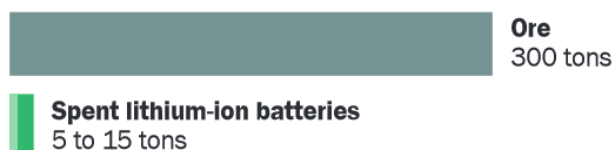
En effet, le **processus génère des rebuts de fabrication assez conséquents** (entre 5 à 10% en régime établi de production). Il est donc majeur, tant d'un point de vue économique que d'un point de vue écologique, que le producteur de batterie mette en place, via différents modèles d'affaire possibles et idéalement en boucle courte et locale, le **processus de récupération des matériaux critiques et leur réutilisation pour la fabrication de nouveaux produits**.

Les **bénéfices du recyclage en coût mais aussi en usage de ressources sont potentiellement importants** comme rappelé dans l'étude menée sous l'égide du département Américain de l'énergie⁶ présentée ci-dessous.

1 ton of battery-grade **lithium** can come from:



1 ton of battery-grade **cobalt** can come from:



Using **recycled materials*** from spent batteries has potential to **decrease**:



- Costs by **40%**
- Energy use by **82%**
- Water use by **77%**
- SO_x emissions by **91%**

*Assumes a direct recycling method

Bénéfices du recyclage (spent lithium-ion batteries) comparé à l'extraction minière (ore) ou à partir de marais salants (brine pour le lithium)

(US National Blueprint for lithium batteries 2021 – 2030, p21)

Cependant, le **recyclage nécessite encore des travaux de R&D importants pour en améliorer l'efficacité, en réduire l'impact environnemental** afin d'atteindre les niveaux de gains annoncés au-dessus. On peut **citer le recyclage hydrométallurgique** comme une avancée majeure en cours d'industrialisation.

⁶ - <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/national-blueprint-lithium-batteries>

Parole d'Experts



Au-delà des solutions technologiques à optimiser, **l'enjeu majeur du recyclage réside sans son passage à l'échelle.**

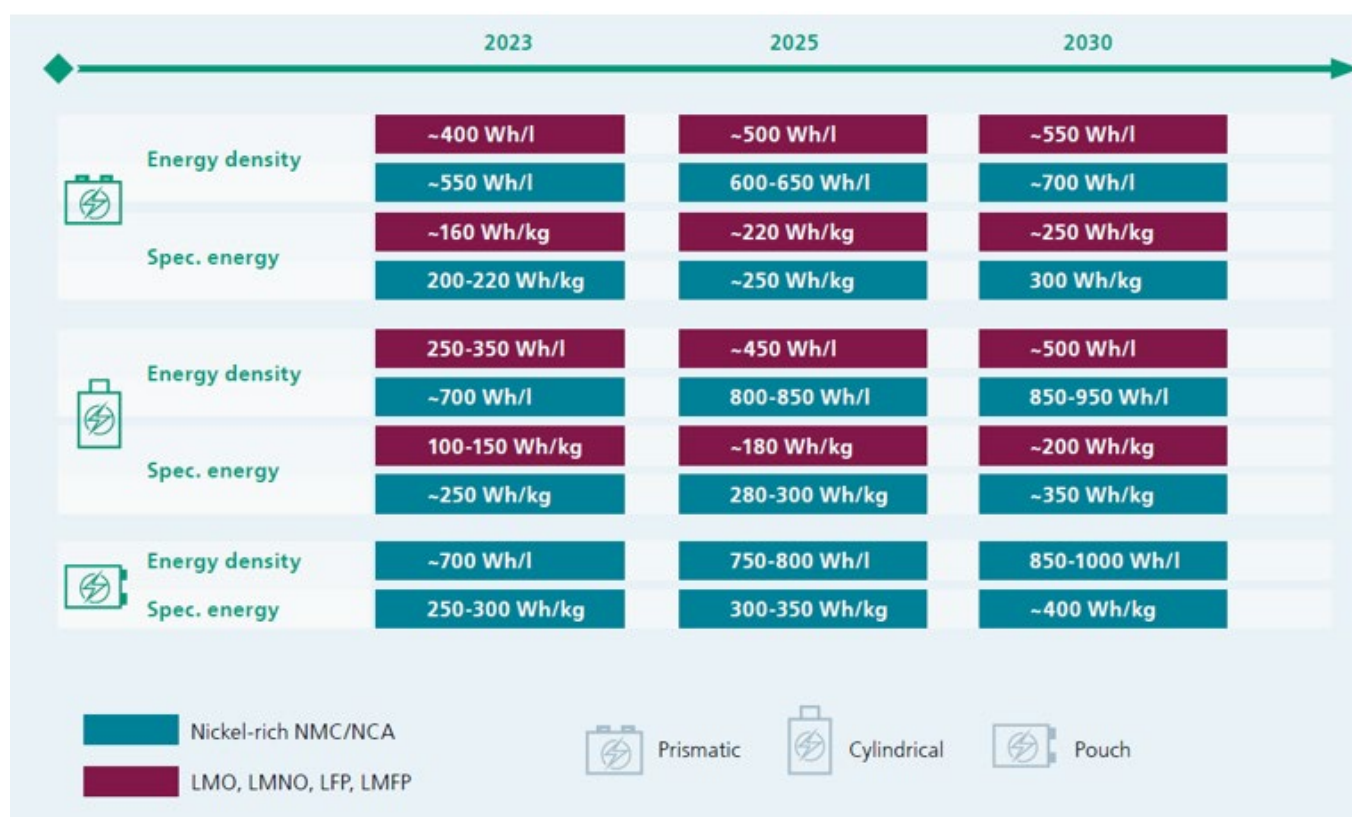
D'une part, parce qu'il y a **trois sources d'alimentation de ce processus** dont les volumes et la temporalité sont différents :

- **les rebuts de production** qui assureront un flux continu de produits à recycler dont le volume augmentera au fil de la montée en cadence des gigafactories
- **les batteries accidentées**, flux que l'on espère le plus faible possible
- **le flux des batteries en fin de vie** qui, grâce à une durée de vie des batteries nettement supérieure à ce qui était évalué au tout début des VE, interviendra massivement au-delà de 2030.

D'autre part, parce que **le recyclage est un processus complexe qui nécessite d'organiser la collecte d'objets lourds, volumineux, coûteux et potentiellement dangereux** (par exemple dans le cas d'une batterie accidentée) ce qui implique la mise en place et la coordination de nombreux acteurs.

Parole d'Experts

Annexe : les développements technologiques des batteries



Evolution des densités d'énergie des cellules en fonction de leur format et du type de cathode utilisée

Il existe encore un **important potentiel de progrès pour la technologie li-ion liquide**, qui appartient à la famille des technologies Métal-ion (Me ion). Mais il existe d'autres familles qui sont Métal Sulfure (Me s), Métal Air (Me air) et Redox⁷.

En complément, **la technologie li-ion solide**, qui présente de solides avantages (i.e., haute densité énergétique, sécurité, charge ultra rapide et faible encombrement), fait l'objet de multiples annonces de la part de différents constructeurs sans pour autant avoir atteint le stade de la production de masse aujourd'hui qui pourrait être atteint en 2030.

⁷ - A la différence des batteries classiques où les ions se déplacent entre le pôle négatif et le pôle positif avec une direction qui diffère suivant qu'il s'agit d'une charge ou d'une décharge, les batteries à flux redox (RFB) se composent de deux réservoirs d'électrolyte dans lesquels l'énergie électrique est stockée sous forme de couples redox (un oxydant et un réducteur forment un couple redox si on peut passer de l'un à l'autre par gain ou perte d'électrons), généralement dans une solution aqueuse. Une cellule de batterie convertit l'énergie électrique en énergie chimique et vice versa.

Parole d'Experts

- **Batteries sodium-ion** : Récemment introduites sur le marché, elles pourraient devenir, grâce à l'abondance du sodium, une alternative économique et écologique majeure permettant une souveraineté industrielle.
- **Batteries lithium-soufre** : excellentes performances mais de gros challenges technologiques à résoudre.
- **Batteries redox** : une recharge en continu pour une mobilité quasi sans limites! A l'état expérimental.
- **Batteries aluminium-air** : une source d'énergie propre et inépuisable, au mieux en 2035 !

		Today & Short term	2025	Medium-/long term	2035	Vision
Me-ion	LIB	200–300 Wh/kg, 600–750 Wh/l 90–175 €/kWh		Continuous improvement	320–360 Wh/kg, 800–960 Wh/l 45–90 €/kWh	
	SIB	140–160 Wh/kg, 250–300 Wh/l 80–120 €/kWh		Optimizing material combinations	> 200 Wh/kg, > 400 Wh/l < 40 €/kWh	
	SIB – Salt	< 150 Wh/kg, 10–25 Wh/l 700–1000 €/kWh*		Increasing operating voltage and reducing costs	< 200 €/kWh*	
	MIB	50–150 Wh/kg, 150–300 Wh/l		Stable cathode-electrolyte combination	> 300 Wh/kg, > 400 Wh/l < 40 €/kWh	
	ZIB	30–60 Wh/kg, 40–100 Wh/l		Stability of electrodes and electrolyte	50–120 Wh/kg, 80–200 Wh/l	
	AIB	30–35 Wh/kg, 35–50 Wh/l, but 9,000 Wh/kg and > 20,000 cycles		Highly corrosive electrolyte	45–50 Wh/kg, 45–80 Wh/l, but > 10,000 Wh/kg and > 50,000 cycles; 10–20 % cost saving compared to LIBs	
Me-S	Li-S	> 300 Wh/kg, 300–450 Wh/l		Cycling stability and power density	550 Wh/kg, 700 Wh/l 50 €/kWh	
	Na-S RT	> 300 Wh/kg		Multiple challenges especially on cathode and anode side	> 350 Wh/kg	
	Na-S HT	180–268 Wh/kg, 300–414 Wh/l, long calendar and cycle lives 300–450 €/kWh*		Cost reduction and safety improvements	220–300 Wh/kg, 320–440 Wh/l, long calendar and cycle lives < 300 €/kWh*	
Me-air	Li-air	<= 500 Wh/kg, but with a very low cycling stability		Safety, energy efficiency, unhealthy side reactions	theoretical: 3500 Wh/kg practical: 1230 Wh/kg	
	Zn-air	100–200 Wh/kg, only flow design with pot. high cycling stability 100–150 €/kWh		No stable planar cell design, low power performance	200–300 Wh/kg, 2000–14000 cycles 10–100 €/kWh	
V-RFB		22–30 Wh/kg, > 10 000 cycles, 20 years calendar life		Improved operational temperature and automated cell stacking	> 35 Wh/kg, > 10 000 cycles, 20 years calendar life	

* Cost on system level

Roadmap de développement pour des technologies alternatives de batterie pour les véhicules électriques

Parole d'Experts



Les rédacteurs :



Jean-Pierre Corniou
CEO, Agile-IT
Président de l'Enjeu
Industrie & Services, Systematic



Marc Alochet
Chercheur en sciences de gestion
CNRS / I3 - CRG /
Ecole Polytechnique, France

Ce Hors-Série « Paroles d'Experts » du GT Décarbonation vous a plu ?

Nous vous donnons rendez-vous prochainement pour le **Chapitre 4 : L'URGENT** : créer localement de nouvelles activités nativement décarbonées

Le GT Décarbonation en logos

Membres & partenaires

