

Précis d'électrification automobile

Mutation majeure de la période actuelle, l'électrification de groupe motopropulseur se présente sous différentes formes plus ou moins complexes. Passage en revue des différents niveaux d'électrification par fonction, des technologies appliquées, du marché et des engagements des constructeurs.



Différents niveaux d'électrification

L'électrification couvre les solutions allant des véhicules micro-hybrides à ceux 100 % électriques. L'hybridation d'un véhicule peut être définie comme l'association d'un groupe motopropulseur thermique avec un système électrique comprenant un ou plusieurs moteurs-générateurs et une batterie de stockage. Cette combinaison est divisée en plusieurs niveaux selon les fonctions fournies, ce qui implique également une montée de la proportion de puissance électrique.

Micro-hybrides

Un système micro-hybride assure la fonction Stop-Start - à savoir coupure et redémarrage automatique du moteur pendant les arrêts momentanés du véhicule - et la recharge de la batterie en priorité lors des décélérations. Mais la récupération d'énergie cinétique reste marginale.

Le système micro-hybride comprend généralement un alerno-démarrreur de 12 V ou 48 V et 6 à 12 kW qui remplace à la fois le démarreur et l'alternateur. Cette machine, placée en face avant du moteur thermique, est reliée à une courroie d'accessoires (position P0). Des machines reliées directement au vilebrequin sont aussi envisageables (P1).

La réduction des émissions de CO₂ varie de 3 % à 5 % sur WLTP et jusqu'à 15 % dans un trafic urbain dense. L'équipement est peu coûteux. En contrepartie, un micro-hybride est parfois jugé insuffisant pour atteindre l'objectif de 95 g CO₂/km fixé par la réglementation européenne pour 2021.

L'une des premières voitures micro-hybrides commercialisées fut le Renault Scenic Hybrid Assist. La Suzuki Swift SHVS est par exemple équipée d'un alerno-démarrreur 12 V, et quelques modèles haut de gamme, tels que l'Audi A8, la Mercedes Classe C ou le Kia Sportage, en ont un de 48 V.

Mild-hybrid

Le terme « mild-hybrid » caractérise un système d'une puissance électrique suffisante pour récupérer une partie de l'énergie cinétique lors des décélérations, et la restituer sous forme mécanique en générant un couple supplémentaire non négligeable dans la chaîne cinématique, fonction particulièrement intéressante avec les moteurs turbosuralimentés qui manquent momentanément de couple à la reprise à bas régime. La puissance électrique permet également d'utiliser le moteur thermique dans des zones de meilleur

rendement en augmentant la charge et en stockant le supplément d'énergie dans la batterie. La traction en électrique seul est marginale, surtout parce que la machine électrique est rarement déconnectable du moteur thermique.

Cette hybridation inclut généralement soit un alerno-démarrreur de 48 V en P0, soit une machine placée entre le moteur thermique et la transmission, sans découplage en amont de la chaîne cinématique (P1). Sa puissance varie de 12 kW sous 48 V à environ 40 kW sous quelques centaines de volts, mais n'excède pas la moitié de celle du propulseur thermique.

Un système mild-hybrid réduit les émissions de CO₂ de 6 à 15 % selon la puissance électrique et la position de la machine. Il fonctionne avec une batterie de faible capacité - moins d'un kWh - puisque l'énergie absorbée est rapidement restituée à chaque accélération, le roulage en électrique n'étant pas dans ses fonctions requises. Ce moindre besoin en stockage d'électricité limite le surcoût, d'autant que des accumulateurs Ni-MH peuvent assurer ce rôle. L'intégration du moteur-générateur en P1 peut être onéreuse car elle nécessite une modification sensible du GMP.

Avec l'Insight puis la Civic IMA, Honda a été l'un des premiers constructeurs à commercialiser ce niveau d'hybridation qui va probablement augmenter sa part de marché avec le développement du 48 volts, comme avec les lancements récents des Mercedes S450 et Range Rover Sport MHEV.

Full-hybrid

Un système « full-hybrid » est défini par sa capacité à propulser le véhicule en mode 100 % électrique sur quelques km, en plus des fonctions assurées en mild-hybrid.

L'autonomie en électrique pur dépend principalement de la capacité de la batterie, alors que la vitesse maxi et l'accélération dépendent de la puissance du moteur électrique.



Alerno-démarrreur en P0 sur Audi A8 micro-hybride

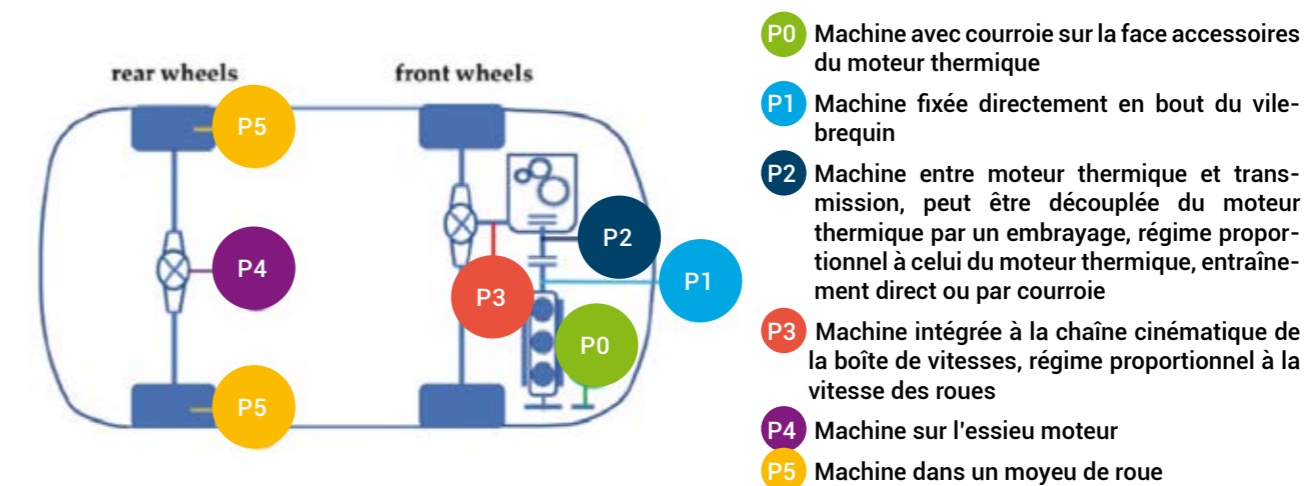
Si l'architecture est parallèle ou en dérivation de puissance (voir plus loin), le moteur thermique peut être remis immédiatement en service dès que la puissance demandée dépasse celle du moteur électrique. Il n'est plus rare que la puissance de la machine électrique dépasse de 60 % de celle du moteur thermique.

Afin d'assurer la propulsion 100 % électrique dans une architecture parallèle, le moteur-générateur doit être découplé du moteur thermique via un embrayage s'il est positionné en amont de la transmission (P2), comme sur la Kia Optima. Quelques applications proposent cette machine sur l'autre essieu que celui entraîné par le moteur thermique (P4). Ainsi, le Peugeot 3008 HYbrid4 a les roues avant entraînées par un 4-cylindres et celles arrière par un moteur électrique. Une batterie Ni-MH ou lithium-ion de 1 à 2 kWh est généralement utilisée.

Le full-hybrid réduit les émissions de CO₂ de 10 à 20 % et permet une propulsion électrique qui peut être imposée par le conducteur. Son coût est supérieur au mild-hybrid en raison de la puissance et de la capacité électriques plus élevées. Les véhicules allant du micro-hybride au full-hybrid sont réu-

POSITIONNEMENT DE LA MACHINE ÉLECTRIQUE

La désignation du positionnement de la machine électrique a été standardisée de P0 à P5. Ce positionnement détermine la capacité de récupération d'énergie cinétique, la possibilité de propulsion électrique et le surcoût d'intégration.



nis sous la dénomination HEV (Hybrid Electric Vehicle), les acronymes MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle) et FHEV (Full Hybrid Electric Vehicle) étant parfois utilisés pour caractériser le niveau d'hybridation.

Hybrides rechargeables

Les hybrides rechargeables, aussi nommés PHEV pour « Plug-in Hybrid Electric Vehicle », sont des full-hybrids équipés d'une batterie de grande capacité pouvant être rechargée sur le réseau. Ils peuvent ainsi assurer une propulsion 100 % électrique sur au moins 45 km en cycle WLTC.

Par rapport aux full-hybrids, leur batterie lithium-ion emmagasine 6 à 14 kWh et un chargeur doit être embarqué. Le moteur-générateur est parfois plus puissant, permettant une vitesse allant jusqu'à 120 km/h, et doit assurer la propulsion sur une longue distance, ce qui impose un refroidissement conséquent, souvent par circuit d'eau.

Les hybrides rechargeables offrent un avantage énorme en termes d'émissions de CO₂ en procédure WLTP puisqu'ils sont souvent homologués à moins de 50 g/km (moins de 2,2 l/100 km). Les études sur le cycle de vie global placent ces véhicules en très bonne position, grâce à leur faible consommation en carburant fossile et à une batterie de taille raisonnable. En contrepartie, les hybrides rechargeables sont nettement plus chers que les full-hybrids car leur batterie est de plus de grande capacité.

Ce marché est pour le moment principalement occupé par des marques haut de gamme telles que BMW, Audi ou Porsche, mais des modèles plus accessibles arrivent comme la DS 7 Crossback hybride rechargeable ou le futur système E-TECH plug-in de Renault, prévu pour les segments B et C.

Tout électrique

Les véhicules 100 % électriques BEV (Battery Electric Vehicle) sont propulsés exclusivement par une ou plusieurs machines électriques alimentées par une batterie rechargeable sur le réseau et, dans une proportion moindre, par la récupération d'énergie cinétique. En procédure WLTP, leur autonomie varie de 150 à 600 km environ selon les modèles, et leurs émissions de CO₂ et de polluants sont nulles. L'autonomie est un des enjeux majeurs des BEV, mais la densité d'énergie des batteries ne cesse de progresser : cette valeur au niveau cellules a été doublée entre 2010 et 2018 pour dépasser 200 Wh/kg, et un nouveau doublement est envisageable dans les 10 prochaines années, toujours en technologie lithium-ion mais avec une électrolyte solide. Cette évolution permettra d'augmenter l'autonomie et/ou de réduire la masse embarquée. Un autre enjeu, le temps de charge est à diminuer en travaillant sur la chimie des cellules et en augmentant la tension (projets à 800 V au lieu de 400 V usuellement). Enfin, le coût par kWh pourrait diminuer de moitié dans environ 10 ans.

Les études sur le cycle de vie global indiquent que ces véhicules sont principalement pénalisés par les nuisances environnementales dues à la production de la batterie. La voiture tout électrique la plus vendue dans le monde est la Nissan Leaf, modèle lancé en 2010 et aujourd'hui en génération deux. En Europe et en France, c'est la Zoé.

HYBRIDATION, PAS SEULEMENT ÉLECTRIQUE

Si l'industrie automobile a désormais pris la voie de l'électricité pour stocker une partie de l'énergie produite par le moteur thermique ou récupérée au freinage, d'autres solutions ont également été testées. Le volant d'inertie, vu chez Porsche et Volvo, et tournant jusqu'à 60 000 tr/min sous vide pour limiter les pertes par frottements, peut restituer une grande densité de puissance, mais sa capacité de stockage est faible. Le groupe PSA avait également travaillé sur un projet d'hybridation hydraulique et stockage d'énergie pneumatique.

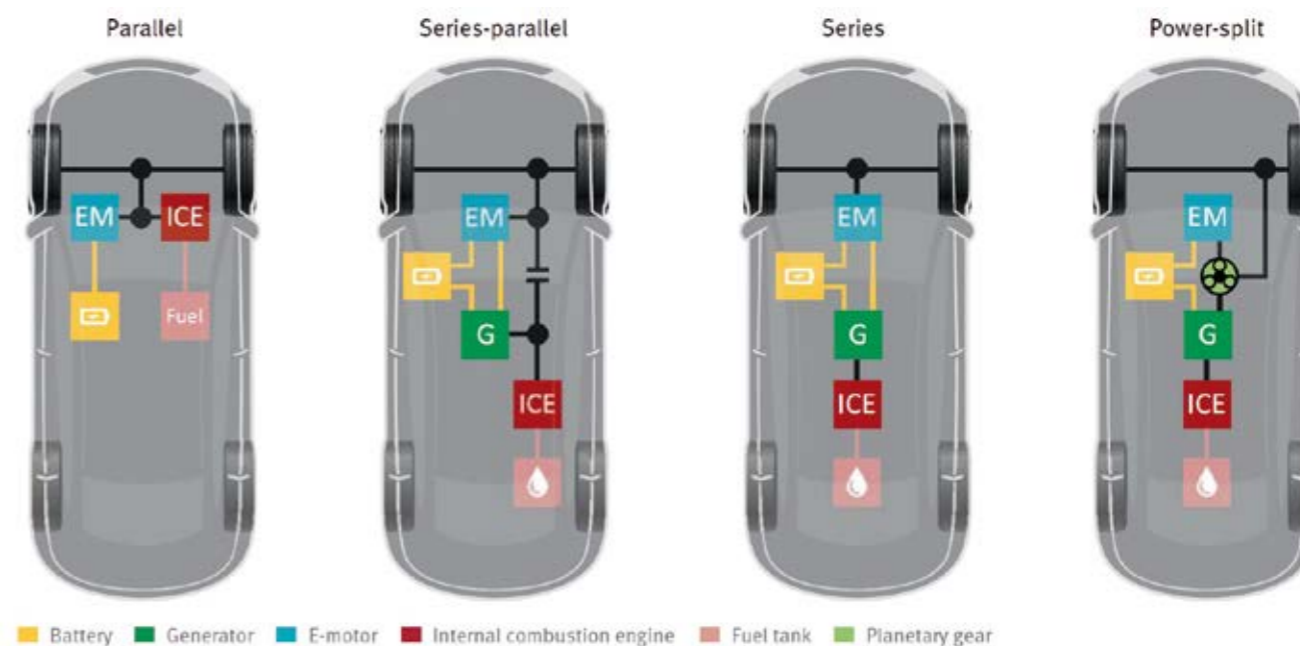
Véhicules électriques à prolongateur d'autonomie

Deux autres variantes du BEV sont proposées afin d'augmenter l'autonomie sans accroître la taille de l'onéreuse et lourde batterie. La première est l'installation d'un prolongateur d'autonomie thermique, constitué d'un moteur à combustion et d'un générateur. Cette solution ne semble plus aujourd'hui avoir la faveur des constructeurs. Ainsi la BMW i3 Rex lancée en 2013 disposait d'une autonomie totale de 320 km selon le cycle NEDC, dont environ 130 km grâce au prolongateur thermique. Elle était homologuée à 13 g de CO₂/km en NEDC. En 2018, avec le passage au WLTP, le constructeur a stoppé la commercialisation de cette version en Europe.

Véhicules électriques à pile à combustible

La seconde variante est le véhicule à pile à combustible, nommé FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle). Ce système produit du courant alimentant la batterie à partir d'hydrogène stocké généralement dans des réservoirs sous 700 bars. À la différence du prolongateur d'autonomie thermique, cette solution ne nécessite qu'une petite batterie – autour d'un kWh – en tant que réserve tampon de puissance et pour la récupération d'énergie cinétique, l'intégralité de l'énergie embarquée étant sous forme d'hydrogène. L'avantage de la densité énergétique de l'hydrogène sous haute pression oriente cette solution vers les véhicules lourds et/ou nécessitant une grande autonomie. L'intégration dans les voitures des réservoirs encombrants est un challenge, mais pas pour les poids lourds et bus qui disposent de place dans le châssis. Les principaux challenges sont le coût de la pile, la disponibilité, la distribution et le coût de l'hydrogène décarboné.

La logique économique fera peut-être émerger la solution d'une pile à combustible en tant que prolongateur d'autonomie d'un véhicule à batterie de capacité moyenne, tel le projet Mercedes GLC F-Cell (batterie de 13 kWh). L'intérêt est de réduire la puissance de la pile à combustible pour en abaisser le coût, la puissance étant fournie par la batte-



Différentes architectures (illustration Schaeffler)

rie. Un autre avantage est d'utiliser uniquement la batterie sur les courts trajets car la charge électrique est moins coûteuse que le ravitaillement en hydrogène.

Différentes architectures hybrides

Plusieurs configurations d'intégration du ou des moteurs-générateurs dans la chaîne cinématique (moteur thermique, embrayage, transmission) sont appliquées, chacune présentant des avantages et inconvénients spécifiques.

Hybride parallèle

Un véhicule hybride parallèle peut être propulsé soit par son moteur thermique, soit par son moteur électrique dans quelques cas, soit par les deux simultanément. Il y a généralement alors une seule machine électrique placée sur la face d'accessoires pour les faibles puissances (Mercedes Classe C) ou bien en amont de la transmission (Golf GTE). Un autre montage rencontré chez quelques constructeurs est un moteur-générateur, entraîné par le propulseur thermique sur l'essieu avant, qui alimente une machine électrique sur l'essieu arrière (PSA HYbrid4). La batterie peut apporter un supplément de puissance ou alimenter seule le moteur pour une propulsion 100 % électrique.

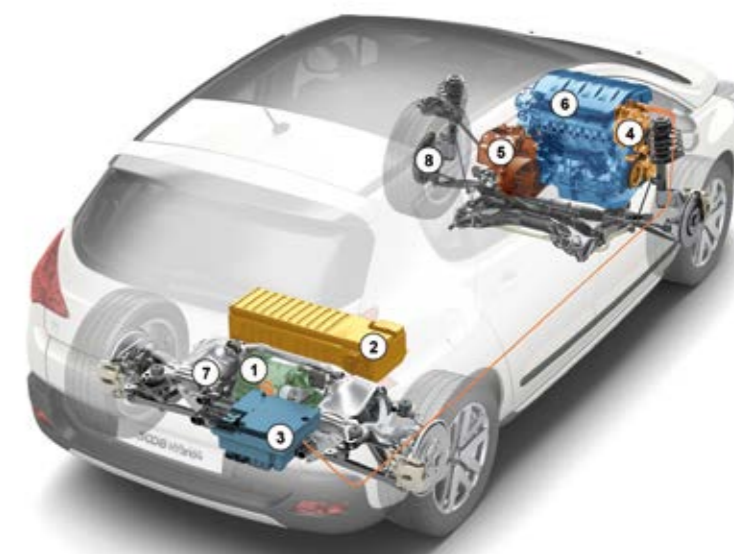
L'emploi d'une seule machine et son introduction facile dans une architecture conventionnelle permettent de limiter le surcoût de l'hybridation. Ce GMP étant généralement accolé à une boîte de vitesses mécanique, manuelle ou automatique, il entraîne les roues avec un bon rendement de la transmission.

En contrepartie de l'utilisation d'une boîte de vitesses mécanique, le moteur à combustion est utilisé sur une plage de fonctionnement identique à celle des véhicules 100 % thermiques, et sa zone de faible consommation spécifique doit rester large, ce qui limite certaines optimisations permettant d'augmenter le rendement maxi de quelques points.

Hybride série

La désignation « hybride série » indique que le moteur thermique entraîne uniquement un générateur qui, à son tour, alimente une batterie et/ou un ou plusieurs moteurs électriques de propulsion (Nissan Note e-POWER ou Ford Transit Custom hybride). Le moteur thermique n'entraîne jamais directement les roues. Ce montage est très répandu en traction ferroviaire.

La transmission est ainsi uniquement électrique, la puissance transitant du générateur vers le moteur électrique en variation continue du rapport. Cette caractéristique, combinée avec la grande vivacité de changement de rapport, permet au moteur thermique de tourner constamment à son



Peugeot Hybrid4 en architecture parallèle
1 : Machine électrique arrière
2 : Batterie
3 : Électronique de puissance
4 : Moteur-générateur avant

5 : Boîte de vitesses
6 : Moteur thermique
7 : Réducteur arrière
8 : Roue

● ● ● point de régime/charge de meilleur rendement en fonction de la puissance demandée, donc avec une consommation spécifique minimale. Un embrayage ou convertisseur de couple n'est pas nécessaire car le décollage est assuré par la transmission électrique. En mode générateur, la machine électrique peut récupérer une grande quantité d'énergie cinétique puisqu'elle doit être nécessairement puissante pour assurer la propulsion. Moteur thermique et générateur peuvent aussi délivrer une puissance inférieure à la machine de traction, le supplément de puissance pouvant être apporté par la batterie.

Une configuration hybride série est onéreuse du fait de l'emploi de deux machines électriques, celle de traction devant être suffisamment puissante pour générer la performance dynamique du véhicule. Un autre point est le rendement relativement faible de transmission car le courant traverse deux machines électriques et leur onduleur, et peut également faire un cycle charge/décharge dans la batterie.

Dérivation de puissance

Cette architecture, également nommée série/parallèle, combine les deux conceptions précédentes. En sortie du moteur thermique, un train planétaire divise le couple en deux voies : d'une part vers un réducteur mécanique relié aux roues motrices, et d'autre part vers une transmission électrique (Toyota Prius). La variation continue du rapport est assurée par la voie électrique. La part de transmission mécanique augmente avec la vitesse, sauf parfois en vitesse de pointe. La batterie peut apporter un supplément de puissance ou alimenter seule le moteur pour une propulsion 100 % électrique.

La dérivation de puissance permet une exploitation du moteur thermique dans sa plage de rendement le plus favorable, et offre un meilleur rendement de transmission que celui de l'hybride série sur l'ensemble de la gamme de vitesse puisqu'une partie variable de la puissance transite mécaniquement. On retrouve aussi les autres avantages de l'hybridation série: décollage facilité et puissance élevée de récupération d'énergie cinétique. La puissance des deux moteurs-générateurs peut s'additionner en propulsion 100 % électrique.

Récapitulatifs des technologies hybrides

Niveau d'hybridation / Architecture	Micro-hybride	Mild-hybrid	Full-hybrid	Hybrides rechargeables
Fonctions principales	Alternateur et démarreur + : • Stop-Start	Micro-hybride + : • Apport de couple • Récupération d'énergie cinétique	Mild-hybrid + : • Propulsion 100 % électrique	Full-hybrid + : • Batterie rechargeable sur le réseau
Parallèle	Suzuki Swift SHVS	Honda Jazz Hybride	Citroën DS5 HYbrid4	DS 7 Crossback hybride rechargeable
Série			Nissan Note e-POWER	Mitsubishi Outlander PHEV (basse vitesse)
Dérivation de puissance			Toyota Prius	Toyota Prius rechargeable
Combinaison d'architectures			Honda CR-V Hybrid	Renault E-TECH plug-in

Ce montage complexe est plus onéreux que les deux premiers car il comprend deux moteurs-générateurs, un train planétaire et plusieurs engrenages.

Combinaison d'architectures

Certaines applications combinent plusieurs types d'hybridation afin d'optimiser le rendement de transmission. Le Mitsubishi Outlander PHEV est en hybride série à basse vitesse, puis il passe en hybride parallèle à partir d'un certain seuil de vitesse. Le Honda CR-V Hybrid est également un hybride série capable de passer en hybride parallèle entre 80 et 120 km/h afin de bénéficier d'un meilleur rendement de transmission. Le futur système e-Tech de Renault basculera également entre plusieurs modes de fonctionnement.

Le projet Hybrid Air de PSA fonctionnait en dérivation de puissance à basse vitesse (voies hydraulique et mécanique), puis commutait vers une boîte de vitesses mécanique à deux rapports à plus haute vitesse.

Le marché de l'électrification de l'automobile

Un futur marché majeur

Si la technologie hybride existe en automobile depuis plus d'un siècle, le véritable développement commercial a réellement commencé son histoire en 1997 avec le lancement de la Prius. Fin 2018, le groupe Toyota a annoncé avoir dépassé la barre des 13 millions d'hybrides vendus dans le monde, la Prius en est à sa 4^{ème} génération et le groupe propose 33 modèles hybrides. Il domine le marché mondial, suivi par Honda, Ford et le groupe Hyundai. Le marché américain domine les ventes d'hybrides.

Tesla écrit une histoire presque similaire dans le marché des voitures électriques à batterie : la marque a terminé en tête des ventes mondiale en 2018, 7 années seulement après le lancement de son premier modèle. La marque américaine est suivie dans ce classement par BAIC, l'Alliance Renault - Nissan et BYD. Toutes années cumulées, la voiture tout élec-



trique la plus vendue dans le monde est la Nissan Leaf. Le marché est dominé par la Chine, et si on ajoute l'Europe et les USA, le trio représente 90 % des ventes.

En 2018, dans les 28 pays de l'Union Européenne, la part des véhicules électriques à batterie a été de 0,83 %, celle des véhicules hybrides rechargeables de 0,84 % et celle des véhicules hybrides de 3,2 %.

Sur cette même période dans les 28 pays de l'Union Européenne et dans l'EFTA (Norvège, Suisse et Islande), il s'est vendu 196 801 véhicules électriques à batterie (soit une progression de 47,6 % par rapport à 2017), 180 741 véhicules hybrides rechargeables (+18,9 %) et 559 267 véhicules hybrides (+32,0 %).

Source : ACEA

Véhicules hybrides = véhicules mild et full hybrids non-rechargeables sur le réseau

Engagements de constructeurs

PSA a annoncé que tous ses nouveaux modèles lancés à partir de 2019 auront une version hybride ou électrique. 8 modèles hybrides rechargeables sur plateforme EMP2, et 7 modèles 100 % électriques sur plateforme CMP seront commercialisés d'ici 2021 pour les segments B, C et D. En 2025, le Groupe ne proposera que des modèles ayant une version hybride ou électrique, et prévoit de commercialiser 10 millions de véhicules faibles émissions dans le monde.

Le groupe Renault commercialise déjà 4 modèles 100 % électriques. Son plan stratégique « Drive the Future » prévoit la commercialisation du véhicule urbain électrique abordable Renault K-ZE sur la Chine en 2019, et des versions hybrides et hybrides rechargeables dès 2020 sur trois de ses véhicules les plus populaires : Clio, Captur et Mégane.

Fiat Chrysler Automobiles a annoncé vouloir lancer 12 systèmes de propulsion qui équiperont 30 modèles allant du mild-hybrid au tout électrique.

Parmi les constructeurs allemands, le groupe Volkswagen offre déjà une douzaine de véhicules hybrides, hybrides rechargeables ou électriques à batterie, et 70 nouveaux modèles dans l'ensemble du groupe, répartis entre les plateformes MEB, MQB et PPE, seront lancés d'ici 2028.

Le groupe BMW disposera de 5 modèles tout électriques en 2021 – les BMW i3, iX3, i4 et le crossover iNEXT, ainsi que la MINI Electric – et comptera au moins 25 modèles électrifiés dont 12 qui seront 100 % électriques en 2025. Le groupe Daimler électrifiera la totalité des gammes Mercedes et Smart d'ici 2022, a prévu de lancer plus de 10 véhicules électriques, et mise sur un investissement de plusieurs milliards dans l'électrification de sa gamme.

Après avoir été le pionnier en hybrides, le groupe Toyota va élargir son offre en lançant 10 modèles électriques à batterie au début des années 2020, et a l'intention de vendre plus de 5,5 millions de véhicules électrifiés par an, dont plus d'un million de véhicules zéro émission (BEV, FCEV) d'ici à 2030. Nissan, actuel leader de la mobilité 100 % électrique, s'est fixé pour objectif la vente annuelle d'un million de véhicules 100 % électriques ou électrifiés d'ici la fin de l'exercice 2022. Honda a fait part de son intention d'équiper de motorisations électriques la totalité des modèles commercialisés en Europe d'ici 2025. Le groupe Hyundai prévoit d'augmenter le nombre de ses modèles électriques ou électrifiés de 14 en 2018 à 31 en 2020 et à 38 en 2025.

General Motors, qui commercialise actuellement la Bolt 100 % électrique, a annoncé le lancement d'au moins 20 autres modèles équipés de ce type de propulsion d'ici 2023. Ford proposera son premier véhicule électrique en 2020, et un investissement de 11 milliards de dollars devrait l'amener à commercialiser 40 nouveaux véhicules électrifiés d'ici 2022.

L'électrification de l'automobile est en marche et les plus hauts niveaux (PHEV, BEV et FCEV) pourraient occuper une grande part du marché à moyen terme dans un écosystème plus global qui reste à mettre en place : production d'hydrogène décarbonée, augmentation du nombre de bornes de recharge électrique et de stations d'hydrogène, recharge rapide (80 % de la batterie en 20 min). Par ailleurs, la possibilité d'échange d'énergie entre véhicules et infrastructures (V2 Home ou V2 Grid) permettra de mieux gérer les capacités électriques. Si la route est encore longue, l'électrification sous toutes ses formes est probablement la direction la plus efficace à prendre pour réduire le réchauffement climatique dû à l'automobile ●

Yvonnick Gazeau