

LES MOTEURS THERMIQUES DANS LE MONDE AUTOMOBILE

1. CONTEXTE ET ENJEUX

Les véhicules automobiles ont principalement eu recours aux moteurs thermiques pour se mouvoir depuis plus d'un siècle. Depuis quelques années, des alternatives à la propulsion thermique pure ont vu le jour sous la forme d'hybridation ou de motorisation purement électrique. C'est le cas en Europe où les constructeurs se tournent vers l'électrification massive de leurs gammes afin de respecter la réglementation européenne sur les émissions de CO₂.

Au niveau mondial, les carburants majoritairement utilisés par les moteurs thermiques sont l'essence et le gazole, même si localement (Inde, Pakistan, Iran, Argentine, Pays Bas, Italie, ...) des parcs de véhicules au gaz existent. Le recours au gazole se fait essentiellement sur les véhicules particuliers en Europe, ainsi que sur les applications VUL et sur les gros pick-up « heavy duty » aux Etats-Unis. Il occupe également une part non négligeable du marché indien. Nous n'évoquerons pas ici les applications poids lourd. Le reste de la production mondiale de moteurs thermiques automobiles fonctionne essentiellement à l'essence. Des versions fonctionnant au GPL ou au GNV existent également, mais leur taux de pénétration du marché reste faible. Le déploiement du GNV se heurte notamment à la mise en place d'infrastructures de distribution, aux contraintes d'implantation et de surcoût sur véhicule. Leur progression sera très locale, nous ne les considérerons pas dans ce document. A l'inverse, l'introduction de bio-carburants dans les carburants conventionnels, voire le remplacement complet de ces derniers par des carburants « 100% » bio, notamment en Amérique latine, paraît être une tendance beaucoup plus forte, et sera abordée dans ce document.

Les études prospectives estiment que les véhicules 100% électriques représenteront environ 20% du marché européen et 10% du marché mondial à l'horizon 2030 (cf. Figure 1).

Dans ce contexte, les motorisations thermiques équiperont encore 80% des véhicules vendus, couplées à une hybridation (tous niveaux confondus). Elles devront donc répondre aux exigences réglementaires à venir, en consommation et en émission de polluants, avec un challenge majeur qui est celui du coût des moteurs, notamment pour les pays émergents, tout en bénéficiant de nouvelles latitudes d'optimisation introduites par l'hybridation et la chaîne de transmission de puissance (boîtes de vitesses évoluées et intelligentes).

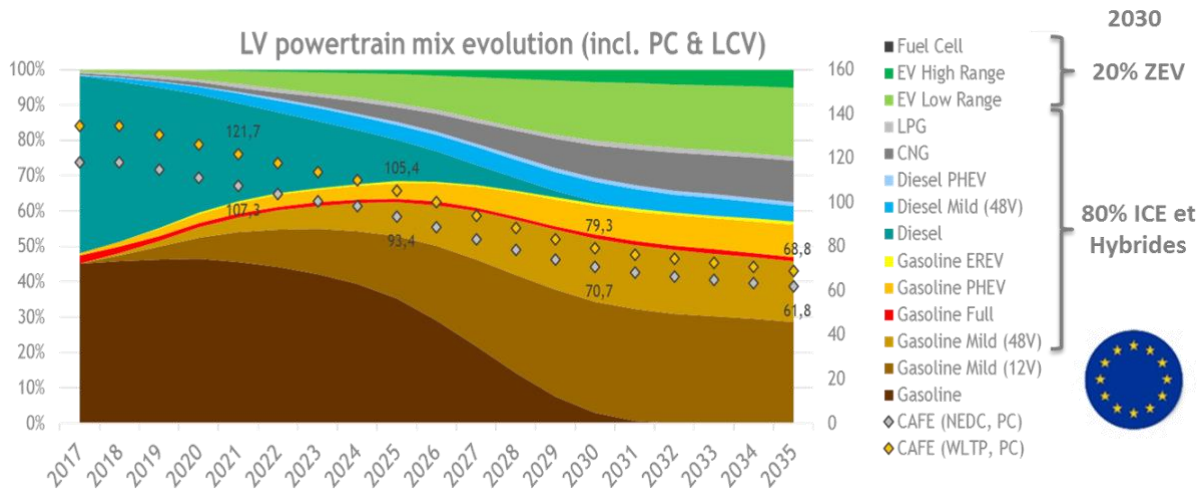


Figure 1 : Mix des chaînes de traction des ventes VL (VP+VUL) Europe dans le scenario Green Constraint du BIPE

Intensité de la **régulation environnementale**

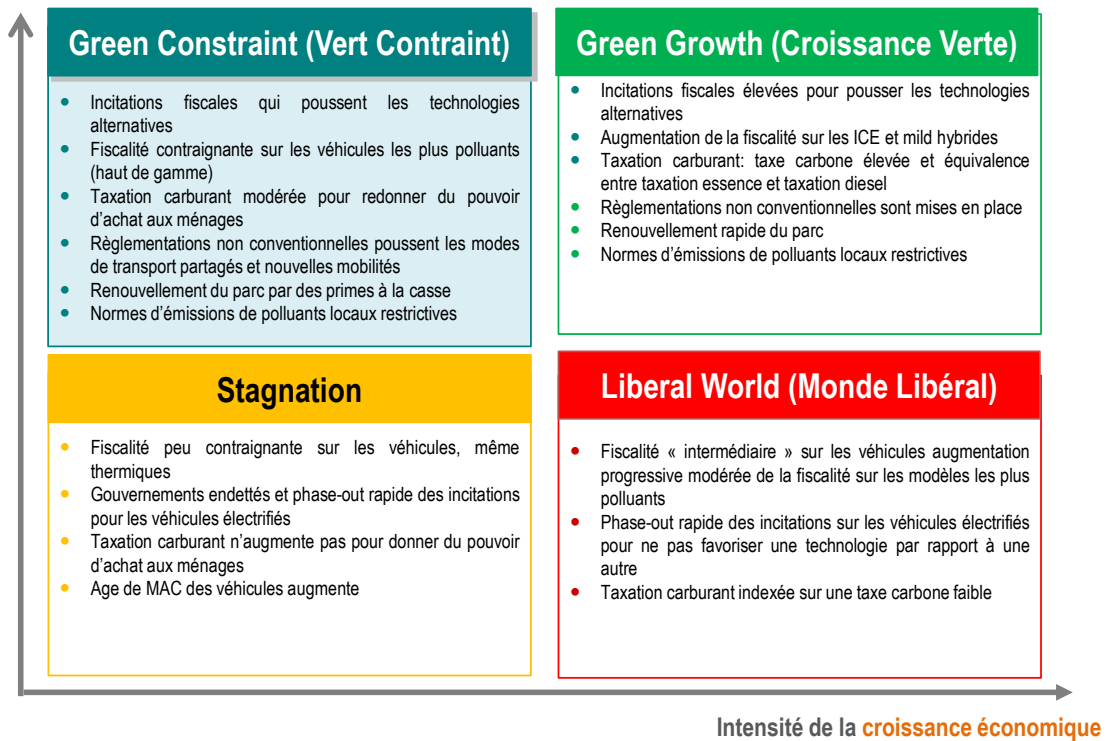


Figure 2 : Scénarios de projection du BIPE

Partout dans le monde, des réglementations visant à réduire les émissions de CO₂ sont mises en place avec des objectifs de plus en plus ambitieux d'année en année (cf. Figure 3).

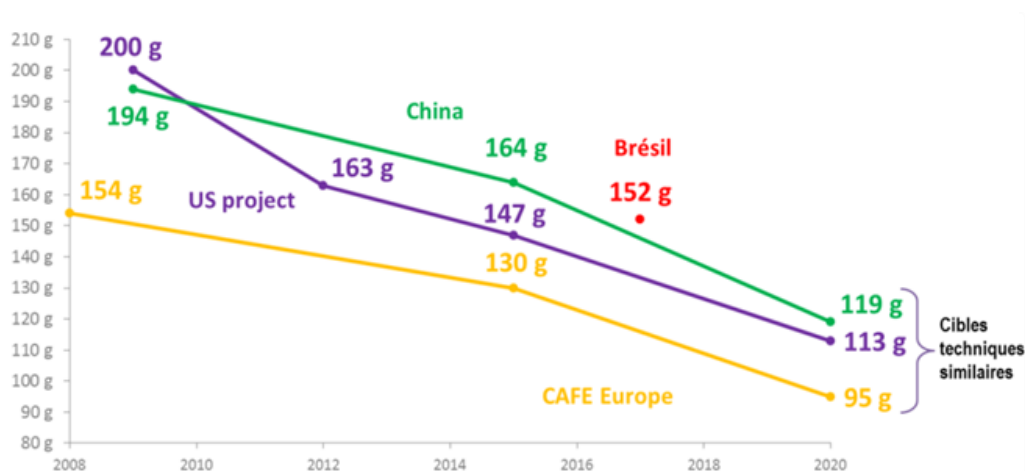


Figure 3 : Convergence CO₂ (g/km) sur les plaques Europe, US et Chine

En Europe, cette réduction des émissions CO₂ est encadrée par la réglementation CAFE avec des objectifs définis jusqu'en 2030. Cette réglementation européenne prévoit une sanction financière de 95€ par gCO₂/km et par véhicule pour les constructeurs qui ne respecteraient pas ces objectifs présentés dans la Figure 4.

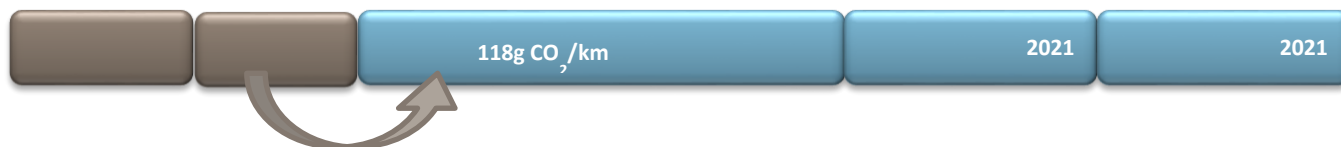


Figure 4 : Evolution des objectifs CAFE en CO₂/km moyens par véhicule et par constructeur

Les normes sur les émissions de polluants (Oxydes d'azote – NO_x , particules - PM, Hydrocarbures imbrûlés – HC et monoxyde de carbone – CO) suivent la même tendance de sévèrisation.

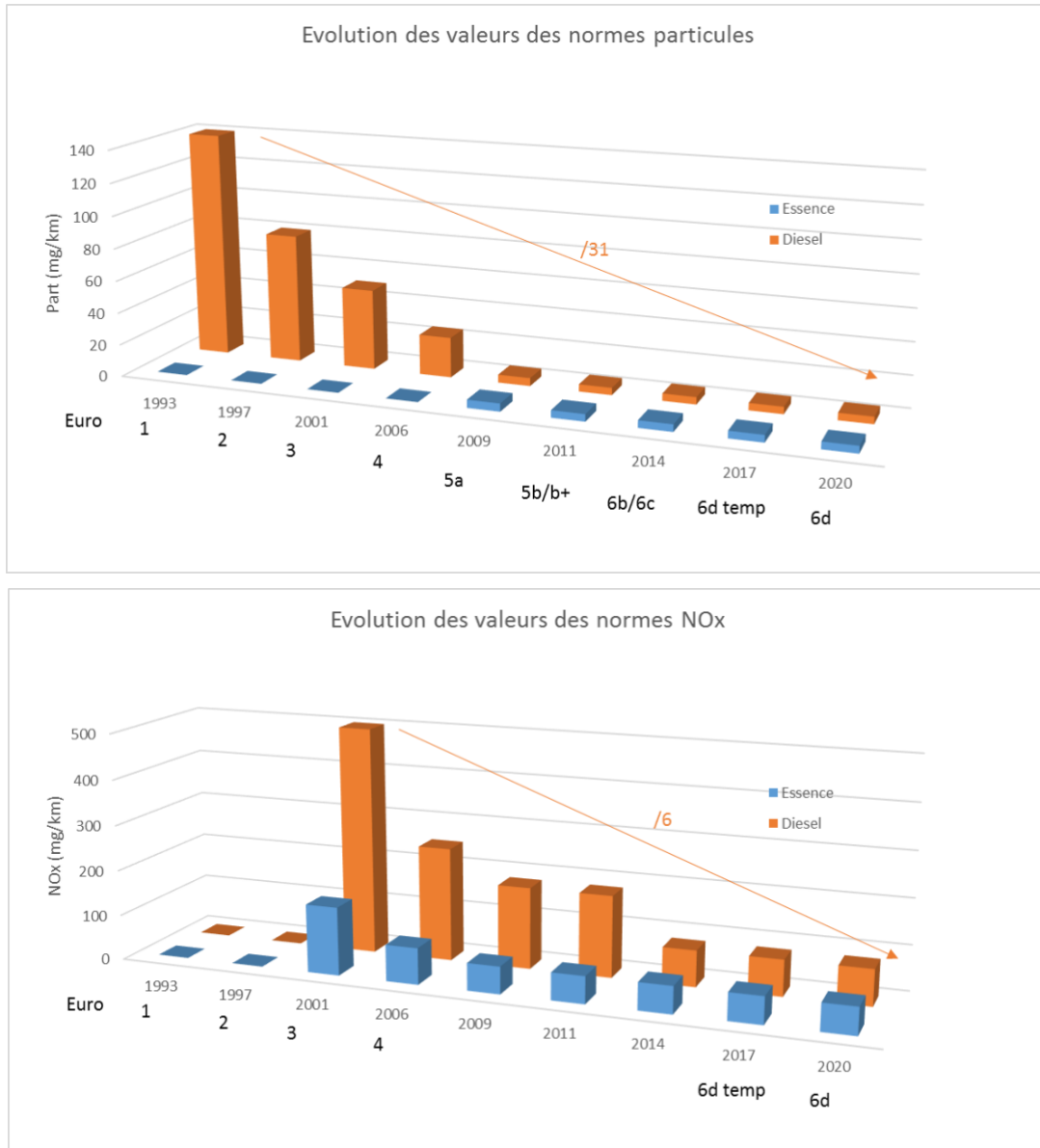


Figure 5 : Illustrations des normes Euro pour les véhicules fonctionnant à l'essence et Diesel

La sévèrisation de ces normes sur les émissions polluantes concerne à la fois l'abaissement des niveaux d'émissions autorisées mais également l'évolution des conditions de test qui garantissent un respect de ces limites en condition réel d'utilisation par les utilisateurs.

Ces évolutions nécessitent que les systèmes de dépollution des gaz d'échappement soient actifs quel que soit le point de fonctionnement du moteur. Ces réglementations tendent également à la convergence sur les émissions essence / Diesel (« fuel-neutral ») (cf Figure 5), comme on le retrouve déjà aux Etats-Unis.

Ces évolutions réglementaires vont avoir un impact très positif sur la qualité de l'air dans les zones urbaines (NOx). L'impact positif de ces évolutions sera observé avec le remplacement progressif des véhicules les plus anciens au profit de véhicules récents.

Les Etats-Unis, l'Europe et le Japon sont les zones les plus exigeantes en termes de réglementation. La Chine devrait rattraper son retard d'ici 2020 alors que le reste du monde ne devrait tendre vers les mêmes niveaux d'exigence vers 2025 en terme de consommation de carburant.

2. RENDEMENT DES MOTEURS THERMIQUES – PISTES D'AMELIORATION

Plusieurs voies sont possibles pour améliorer le rendement des moteurs thermiques, prioritairement l'augmentation du taux de compression et/ou la réduction des transferts thermiques dans la chambre de combustion par dilution (EGR et mélange pauvre).

En essence, afin de limiter la complexité des systèmes de posttraitement, l'application d'un mélange "stœchiométrique" - générant une combustion homogène et complète - est aujourd'hui privilégiée pour le moyen terme. Néanmoins des systèmes de combustion mélange pauvre restent à considérer, parmi lesquels figurent des concepts d'allumage par compression (GCI).

En diesel, le système de combustion est confirmé, l'amélioration du rendement moteur est étroitement associé aux émissions et à la performance du système de posttraitement.

Pour les carburants alternatifs, principalement le GNV dans un premier temps, les leviers envisagés sur les moteurs conventionnels s'appliqueront.

A noter que dans un Monde où l'électrification des chaînes de traction est croissante, les contraintes et leviers offerts par cette dernière sont à considérer.

- En essence, les principaux défis à relever pour améliorer le rendement des moteurs thermiques sont :
 - Concevoir une chambre de combustion avec un taux de compression géométrique élevé (de 14 à 16) en maintenant une aérodynamique interne adaptée à la combustion.
 - Appliquer des niveaux de dilution élevés pour limiter les pertes thermiques et contribuer à repousser l'auto-inflammation.
 - Repousser les limites cliquetis et rumble.
 - Maintenir le niveau de performance du moteur remplacé car certains leviers techniques peuvent affecter les performances spécifiques (puissance et couple). Tout en améliorant la compacité des moteurs actuels qui doivent maintenant partager l'environnement sous capot avec les composants électriques.

Les solutions techniques envisagées sont les suivantes :

- Pour la conception de la chambre de combustion, dessin de la chambre privilégiant le redressement des soupapes, optimisation de la géométrie des conduits en utilisant des solutions industrielles innovantes et amélioration du ratio surface volume en travaillant le rapport alésage / course. Optimisation de la forme de la chambre de combustion et du piston pour conserver l'aérodynamique et répartir la turbulence. Le but étant de maintenir une vitesse et une stabilité de combustion élevées.

- Pour atteindre des niveaux de dilution élevés, systèmes de distribution variables pour appliquer de fort taux de gaz résiduel (IGR) et/ou EGR favorables à la réduction des transferts thermiques et au pompage.
- Pour limiter le risque de combustions anormales, utilisation d'un système à taux de compression variable pour dé-contraindre les limites fonctionnelles en fortes charges, approche combustion type Miller ou Atkinson, dilution de la charge moteur via recirculation des gaz d'échappement et l'augmentation du rapport alésage / course. Système d'allumage « boosté » si nécessaire. Nous pouvons également utiliser l'injection d'eau dans la chambre de combustion pour refroidir le mélange réactif et repousser les phénomènes de combustion anormales.
- Pour maintenir le niveau de performance du moteur, amélioration du remplissage via le système de suralimentation du moteur en utilisant un turbocompresseur à géométrie variable en lieu et place d'un turbocompresseur à géométrie fixe ou en utilisant un turbocompresseur électrifié si les performances de ce dernier sont insuffisantes (et qui en outre offre l'opportunité de récupérer l'énergie des gaz d'échappement sous forme électrique), géométrie variable éventuelle sur le compresseur pour repousser la ligne de pompage, augmentation de la cylindrée moteur (compromis rendement / performances spécifiques). L'utilisation de la machine électrique du système hybride peut également être envisagée pour compenser de manière transitoire le déficit de couple ou de puissance.
- Pour améliorer ou conserver la compacité des moteurs actuels tout en augmentant la cylindrée, utilisation de solutions industrielles innovantes - tel que revêtement plasma pour augmenter l'alésage à iso entraxe fut - et d'approche cinématique embiellage permettant d'augmenter la course utile. La suppression de la façade accessoires peut également être envisagée en utilisant des composants électrifiés.
- Pour réduire les émissions polluantes générées lors de la combustion, augmentation de la pression d'injection du carburant.

En complément, les optimisations des pertes par frottement - incluant les opportunités apportées par l'électrification - et du thermo-management sont des leviers également investigués.

- En Diesel, les principaux défis à relever pour améliorer le rendement des moteurs thermiques sont :
- Concevoir une chambre de combustion permettant d'améliorer le rendement tout en limitant les émissions à la source afin de ne pas pénaliser la consommation du moteur au titre du compromis CO₂/NO_x.
- Limiter les pertes thermiques en appliquant des niveaux de dilution élevés ou en isolant la chambre de combustion.
- Identifier des solutions (moteur) permettant un amorçage rapide du système de posttraitement.
- Maintenir le niveau de performance du moteur remplacé car certains leviers techniques peuvent affecter les performances spécifiques (puissance et couple).

Les solutions techniques envisagées sont les suivantes :

- Pour la conception de la chambre de combustion, dessin de la chambre et système d'injection à pression augmentée, optimisation de la géométrie des conduits et amélioration du ratio surface volume en travaillant le rapport alésage / course, distribution variable.

- Pour limiter les pertes thermiques et pour atteindre des niveaux de dilution élevés, système EGR « boosté » par une suralimentation double étage ou un compresseur / turbocompresseur électrifié, adiabatisation de la chambre et des conduits.
- Pour amorcer rapidement le système de posttraitement, utilisation de système de distribution variable et/ou électrification du système de posttraitement (chauffage électrique)
- Pour maintenir le niveau de performance du moteur, amélioration du remplissage via le système de suralimentation du moteur en utilisant une double suralimentation ou un turbocompresseur à géométrie variable en lieu et place d'un turbocompresseur à géométrie fixe ou en utilisant un turbocompresseur électrifié si les performances de ce dernier sont insuffisantes (et qui en outre offre l'opportunité de récupérer l'énergie des gaz d'échappement sous forme électrique), géométrie variable éventuelle sur le compresseur pour repousser la ligne de pompage, augmentation de la cylindrée moteur (compromis rendement / performances spécifiques). L'utilisation de la machine électrique du système hybride peut également être envisagée pour compenser de manière transitoire le déficit de couple ou de puissance.

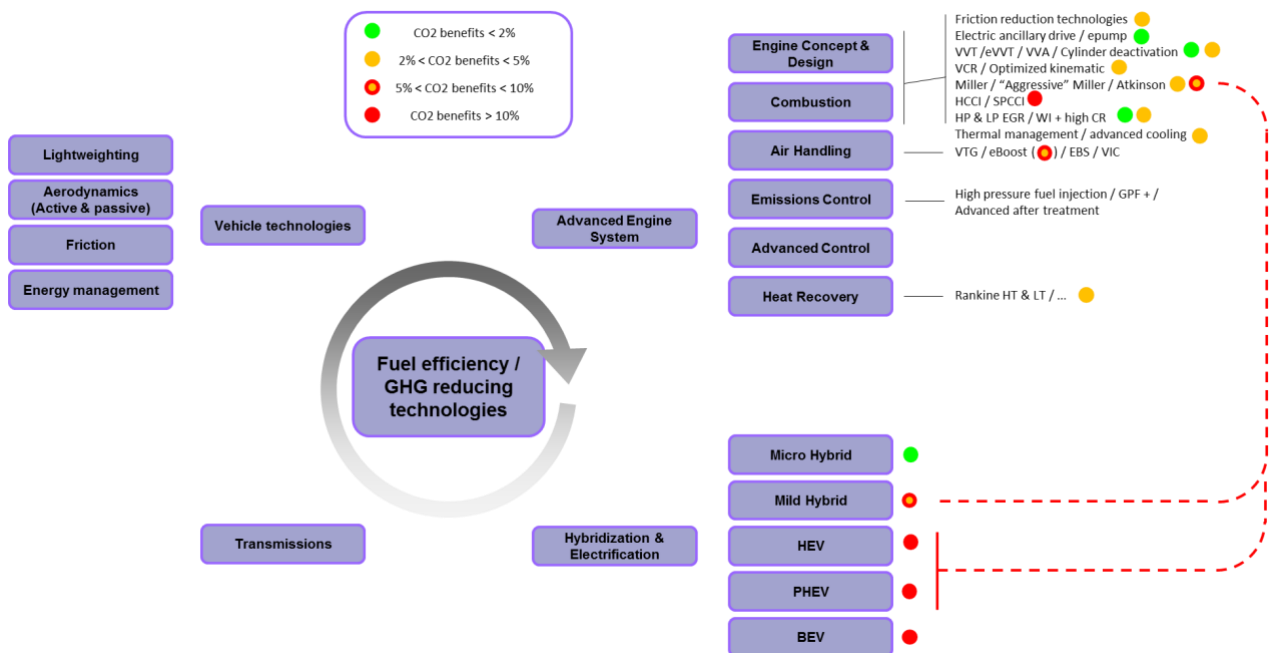


Figure 6 : Les solutions techniques envisagées pour améliorer les moteurs thermiques

3. HYBRIDATION – IMPACT SUR LES MOTEURS THERMIQUES

Il existe plusieurs types d'hybridations (cf. Tableau 1) utilisant un moteur thermique :

- Mild-hybride : tend à devenir un standard dans les années à venir en Europe
- Full hybride : avec une faible capacité de roulage 100% électrique
- Plug-in : capacité de recharge et roulage 100% électrique
- Range extender : véhicule électrique hybridé avec un prolongateur d'autonomie

VALEURS TYPQUES	Puissance élec.	Energie élec.	CO ₂ Cycle (NEDC)	Roulage ZEV	Autonomie	Impacts moteur thermique
Mild Hybrid	10 – 20kW	0,5 – 1kWh	-10 – 20%	0 – 0,5km	500 – 1 000 km	<p>Complexité & Cout ICE</p> <p>Niveau d'électrification</p>
Full Hybrid	15 – 50kW	1 – 2kWh	-20 – 30%	1 – 3km	500 – 1 000 km	
Plug-in Hybrid	40 – 110kW	5 – 15kWh	-40 – 60%	20 – 60km	500 – 1 000 km	
VE range extender	> 50kW	8 – 25kWh	-60 – 80%	50 – 150km	300 – 500 km	
Véhicule électrique	> 50kW	15 – 100 kWh	-100%	100 – 500 km	100 – 300 km	

Tableau 1 : Différents types d'hybridation et leurs caractéristiques

A chaque niveau d'hybridation, le cahier des charges du moteur thermique change.

Pour les hybridations légères (mild-hybrid), le moteur thermique reste l'organe de propulsion principal du véhicule. Les attendus pour le moteur thermique sont les mêmes que ceux pour un véhicule conventionnel. L'hybridation permet de réduire l'utilisation du moteur sur ses points de fonctionnement les moins vertueux (ralenti et faibles charges). Dans certains cas, ce type d'hybridation permet également de récupérer et valoriser une partie de l'énergie de freinage.

Pour les hybridation full-hybrid (HEV et PHEV), le moteur électrique est suffisamment puissant pour modifier significativement l'utilisation du moteur thermique et récupérer une grande partie de l'énergie de freinage. La chaîne de traction est plus chère qu'une chaîne de traction conventionnelle mais elle permet d'optimiser l'utilisation de chaque composant. Ainsi, les attendus pour le moteur thermique sont d'avoir une zone de haut rendement (cf. Figure 7) et d'être à plus faible cout qu'un moteur conventionnel afin de compenser en partie l'impact économique de l'hybridation (exemple moteur Atkinson Toyota).

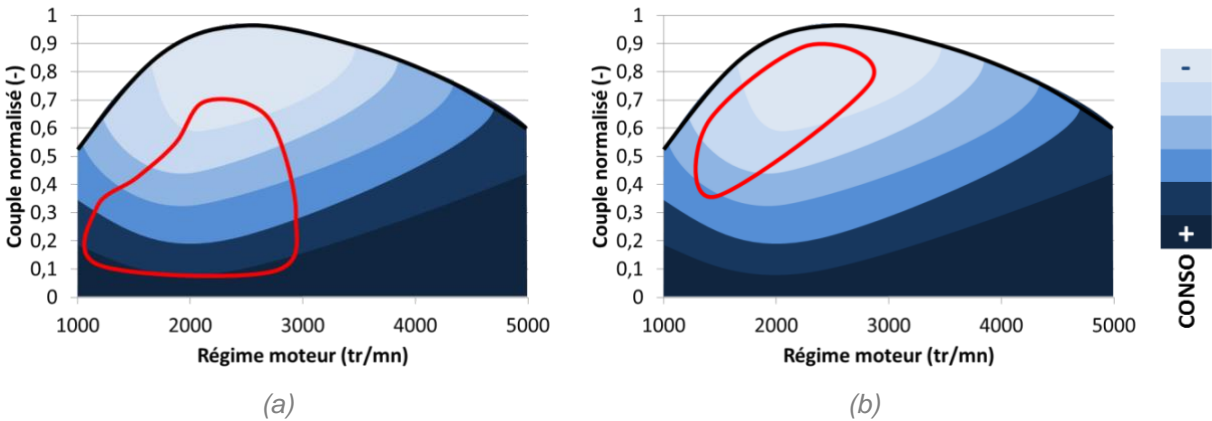


Figure 7 : Utilisation type du moteur (en rouge) avec (a) une transmission classique, (b) une transmission hybride, dans le plan Régimes / Couples

Les chaînes de traction type range extender peuvent être vues comme un véhicule électrique (BEV) hybridé avec un prolongateur d'autonomie utilisant un carburant. Le moteur thermique est utilisé comme un générateur d'énergie mécanique permettant d'alimenter une génératrice électrique et prolonger l'autonomie du BEV. Dans ce cas, les attentes pour le moteur thermique sont différentes car le client de ce type de technologie est un client habitué aux prestations d'un BEV. Les critères à considérer dans un compromis global sont la compacité, le coût très faible sous contrainte émissions. Le niveau d'émissions polluantes ne devra pas excéder celui d'une chaîne de traction conventionnelle, même en mode « charge sustaining ».

Les moteurs de type Diesel restent pour l'instant les mieux positionnés en coût et prestation pour répondre aux besoins des véhicules utilitaires parcourant de grandes distances.

Une autre voie de gains en rendement sur un aspect « système » est la récupération et la valorisation des pertes thermiques. Dans un moteur conventionnel, une partie significative de l'énergie du carburant est dissipée sous forme de pertes thermiques aux parois (collectée dans l'huile et l'eau moteur) et une autre partie est perdue à l'échappement du moteur.

Il existe des voies de récupération et valorisation de cette énergie. Récupération via des convertisseurs thermoélectriques ou via des cycles thermodynamiques. L'énergie peut ensuite être réinjectée sous forme d'électricité dans le réseau électrique de la voiture (réseau et batterie 12V) ou réinjectée sous forme d'énergie mécanique pour aider à la propulsion de la voiture et réduire la consommation d'énergie du moteur thermique.

Nous pouvons citer les technologies de turbo-compound, thermoélectricité, cycle de Rankine, autres cycles thermodynamiques (heat to power), thermo-acoustique, etc.

Attention, les systèmes additionnels de récupération d'énergie thermique sont souvent coûteux et/ou volumineux. Il n'a pas encore été trouvé de système économiquement viable dans un contexte automobile autre que la valorisation de cette énergie thermique pour faire fonctionner l'air conditionné (climatisation et chauffage habitacle).

4. PERSPECTIVES

La commission Européenne est engagée dans une politique de réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. La réglementation CAFE actuelle considère les émissions des véhicules du « réservoir à la roue ». Par exemple, la quantité de biocarburant déjà présente dans les carburants européens actuellement disponibles à la pompe (E10 ou B7) n'apparaît pas dans le bilan CO₂ des véhicules thermiques. A l'inverse, le bilan CO₂ des mix électriques utilisés pour alimenter les véhicules électriques ne sont pas attribués au véhicules et les BEV sont actuellement considérés comme n'émettant pas de CO₂ dans le bilan CAFE des différents constructeurs.

Par ailleurs, seule la phase d'usage des véhicules est considérée dans le bilan d'impact de la mobilité sur les gaz à effet de serre.

Hors, les émissions de gaz à effet de serre sont générées sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules. Incluant la phase d'extraction des matières premières, de production, d'usage et de recyclage des véhicules. De la même façon, le contenu CO₂ des énergies utilisées pour chacune de ces étapes de cycle de vie doit être totalisé pour avoir un bilan global de chacune des technologies ou des filières énergétiques utilisées.

Ces approches de bilan complet sont décrites dans la méthode d'Analyse de Cycle de Vie. Elles s'appuient sur les notions de « Cradle to Grave » pour les véhicules et « Well to Wheel » pour les filières énergétiques (cf. Figure 8).

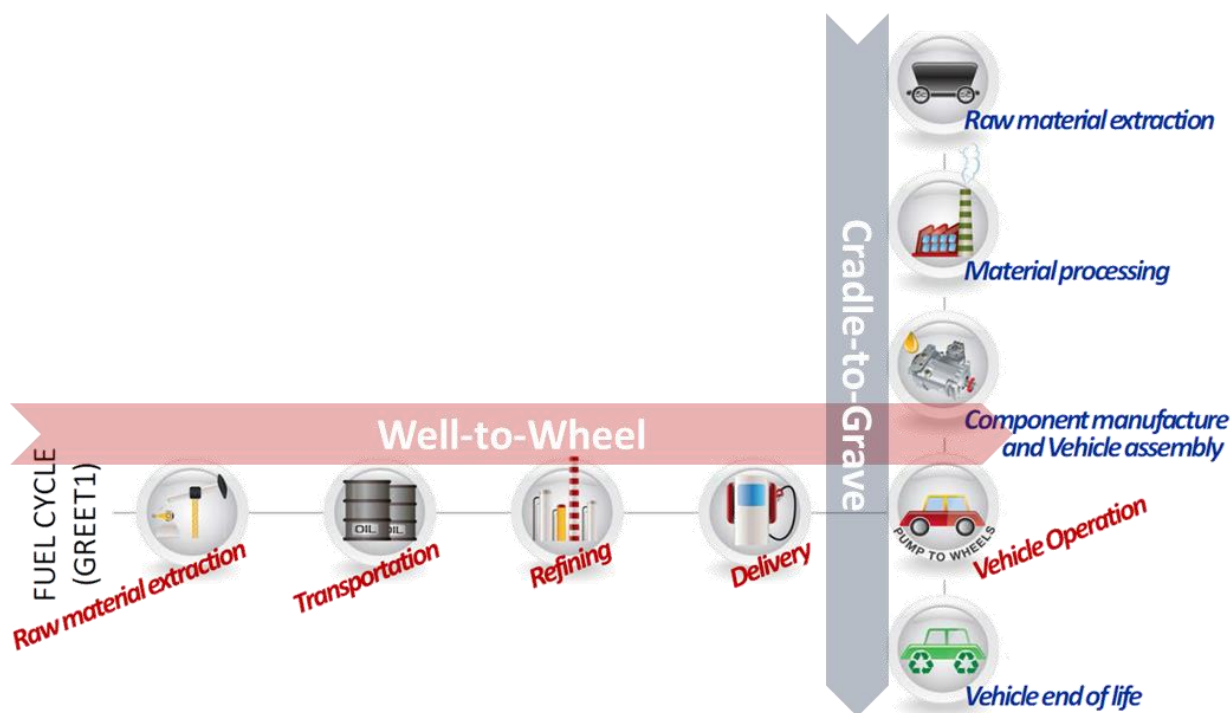


Figure 8 : Illustration des approches « Well to Wheel » et « Cradle to Grave »

Consciente de cette nécessité d'évolution dans ses méthodes d'analyse, la commission européenne a confié à la société Ricardo la mise en place d'une méthodologie de caractérisation de l'impact global en CO₂ pour les constructeurs en Europe dans une approche LCA. Cette méthode doit être proposée pour déployée en phase de test à partir de 2026 pour une éventuelle réglementation post-2030.

Si la commission européenne change la façon de comptabiliser les émissions CO₂ en adoptant une vision plus globale que celle utilisée actuellement, l'impact sur les orientations technologiques ou les filières énergétiques pourrait être important tel qu'illustré par l'étude Ricardo commandée par le CONCAWE :

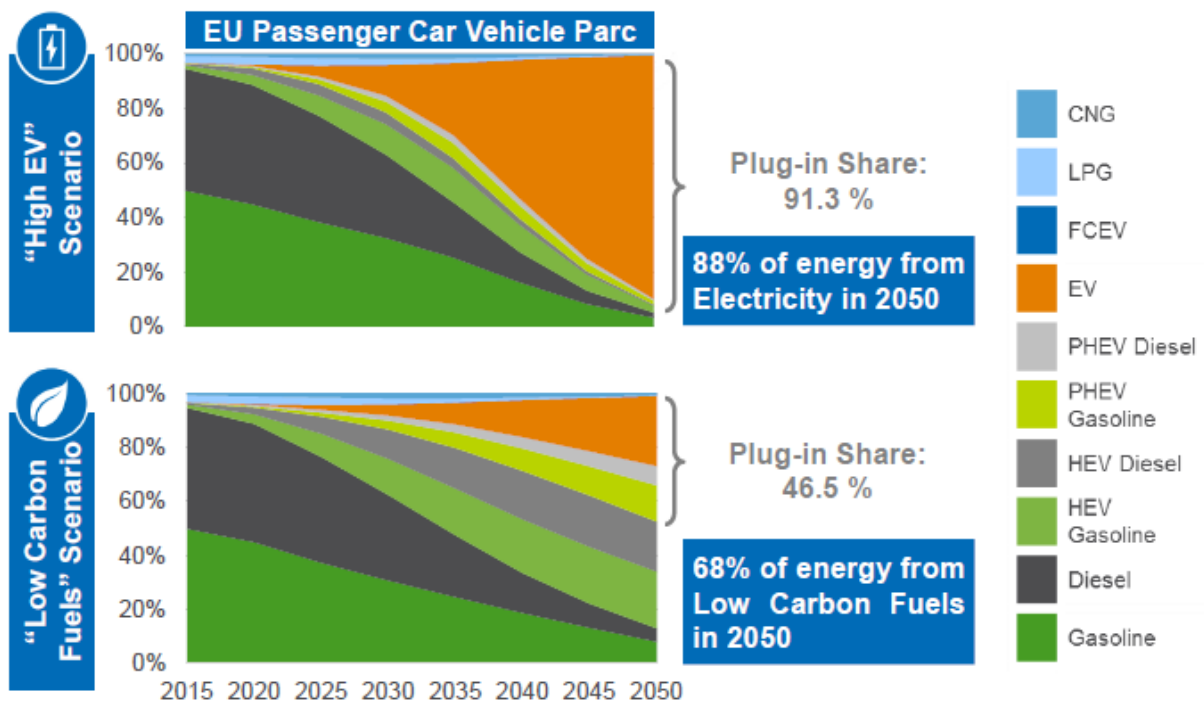


Figure 9 : Evolutions des mix technologiques des chaînes de traction pour différents scénarios (Etude Ricardo pour CONCAWE)

Il est essentiel pour les acteurs du domaine automobile d'être attentifs aux évolutions sociétales et aux évolutions réglementaires associées qui peuvent changer drastiquement les choix technologiques des chaînes de traction futures dans les différentes régions du Monde.

Les technologies de moteur thermique se sont significativement améliorées ces dernières années. En association avec des chaînes de traction électrifiées ou des carburants renouvelables, elles peuvent accompagner l'amélioration de la qualité de vie en offrant des solutions de mobilité abordables et à faible impact environnemental.

5. SYNTHÈSE

Le moteur thermique restera une réponse technique adaptée à l'automobile et, ainsi, aux enjeux de mobilité futurs de par sa solution efficace, simple d'usage et abordable pour les clients, permettant d'adresser l'ensemble des usages mondiaux. A l'horizon 2030, il représentera encore plus de 80% du marché des chaînes de traction, dont la moitié sera couplée à une hybridation (tous niveaux confondus). Les normes sur les émissions de polluants se sévèrent et seront convergées essence / Diesel à horizon €7 («fuel-neutral»). La diffusion des véhicules respectant les nouvelles normes aura un impact positif fort sur la qualité de l'air dans les centres urbains. Les leviers pour améliorer la performance CO₂ sont identifiés ; une comparaison objective des différentes solutions de mobilité devra être réalisée suivant une analyse de cycle de vie complète et non pas seulement sur la phase d'usage du véhicule.

Sur l'aspect purement moteur thermique, les améliorations de son rendement, des émissions à la source et de l'efficacité des systèmes de post-traitement sont et resteront des contributeurs incontournables pour la baisse des émissions de CO₂, sous contraintes élevées de réduction des émissions polluantes tout en maîtrisant les coûts. Les leviers sont identifiés et de nouvelles opportunités, permises notamment par les évolutions matériaux et process, sont en cours d'exploration.

L'hybridation et les évolutions fortes des systèmes de transmissions de puissance amènent à des GMP optimisés permettant de concentrer l'utilisation du moteur thermique sur ses zones de fonctionnement peu émissives (polluants et CO₂) et de bénéficier de l'avantage de la récupération de l'énergie au freinage. Un autre axe de gain en émissions polluantes et CO₂ est la récupération des pertes thermiques. Les technologies de récupération d'énergie thermique seront développées sous contraintes de coût et packaging.

Une voie complémentaire dans la réduction des émissions de CO₂ pourrait être l'utilisation du gaz naturel, l'exploitation du potentiel des bio-carburants et, en prospectifs, des carburants alternatifs (e-fuels). Ces derniers permettant, même intégrés de façon minime, de réduire les émissions de gaz à effet de serre du parc dans une approche puit à la roue. L'adaptation à la variabilité carburant dans le monde est et restera une contrainte. L'opportunité d'utiliser des additifs (boosters de combustion) pour améliorer le rendement des moteurs ou leurs émissions est une piste à explorer.

Cette dernière approche fait apparaître l'importance d'une norme émissions CO₂ prenant en compte le bilan du puit à la roue et une analyse de cycle de vie complète afin de comparer les différentes solutions de mobilité, par rapport à leur impact global sur l'environnement.

6. GLOSSAIRE

BEV	Battery Electric Vehicle	LCV	Light Commercial Vehicle
CNG	Compressed Natural Gas	LP	Low Pressure
CR	Compression Ratio	LPG	Liquefied Petroleum Gas
CO	Monoxyde le carbone	NEDC	New European Driving Cycle
EGR	Exhaust Gas Recirculation	NO _x	Oxydes d'azote
EV	Electric Vehicle	PC	Passenger Car
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicule	PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
GCI	Gasoline Compression Ignition	PM	Particulates Mass
GNV	Gaz Naturel pour Véhicule	PN	Particulates Number
GPF	Gasoline Particle Filter	RDE	Real Driving Emissions
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié	EREV	Electric Range Extender Vehicle
HC	Hydrocarbures	VCR	Variable Compression Ratio
HCCI	Homogeneous Compression Combustion Ignition	VL	Véhicule Léger
HEV	Hybrid Electric Vehicle	VTG	Variable Turbine Geometry
HP	High Pressure	VP	Véhicule Particulier
ICE	Internal Combustion Engine	VUL	Véhicule Utilitaire Léger
IGR	Internal Gas Recirculation	WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures
LCA	Life Cycle Assessment	ZEV	Zero Emission Vehicle