

Enjeux de l'électrification des véhicules

La pollution atmosphérique se place au cœur des problématiques mondiales, ses conséquences sont néfastes sur la santé publique et l'environnement. Dans plusieurs régions, la qualité de l'air est dégradée à cause de divers polluants tels que les NO_x (x=1 : monoxyde d'azote, x=2, dioxyde d'azote ...) et les particules de matière fine (PM), dont les seuils fixés par les standards sont régulièrement dépassés. Les origines de cette pollution sont diverses et peuvent dépendre de l'homme ou de la nature. On peut citer notamment l'énergie fossile utilisée dans l'industrie et dans les moyens de transport [1].

Le secteur du transport occupe particulièrement une part importante de la pollution atmosphérique. A titre d'exemple, l'agence européenne pour l'environnement « AEE » a annoncé en 2008 que ce secteur représente environ un tiers de la consommation énergétique globale et plus du cinquième des émissions de gaz à effet de serre des pays membres, cela étant dû principalement à la dépendance des transports à l'égard des combustibles provenant des ressources fossiles [2].

Afin de réduire cette dépendance des transports vis-à-vis des énergies fossiles, l'électrification des moyens de transport routier, s'avère incontournable, ce qui permet d'utiliser les sources d'électricité pour alimenter les transports, en l'occurrence les énergies renouvelables qui sont les plus intéressantes du point de vue environnement et durabilité [3].

L'intérêt et la modalité de l'augmentation du taux de pénétration des véhicules électrifiés dans le marché de l'automobile doivent tenir compte des sources de production d'électricité qui changent d'un pays à un autre. En effet, certains modes de production d'électricité ont des émissions de GES importantes, ce qui réduit l'intérêt pour les véhicules tout électrique. La Figure 1.1 montre les émissions de CO₂ de plusieurs types de véhicules, avec ou sans électrification, en fonction de la source d'électricité. A l'instar de l'hybridation des véhicules, son apport énergétique est moins équivoque du fait de la récupération de l'énergie de freinage et le « downsizing » des moteurs thermiques qu'elle permet, indépendamment du mode de production de l'énergie électrique.

Sur le plan énergétique, la chaîne de traction tout électrique possède un rendement beaucoup plus important que celui de la chaîne de traction thermique [7]. Ceci peut permettre, avec les véhicules tout électrique, une réduction de la consommation globale d'énergie (du puits à la roue) comme montré dans la Figure 1.2.

On peut voir dans la Figure 1.2, que la consommation de l'énergie primaire pendant le fonctionnement d'un véhicule (en considérant un kilométrage total de 150 000 km des véhicules), est plus réduite pour les véhicules électriques, par rapport aux véhicules thermiques à essence et à diesel (voir la colonne en orange pour l'électricité et les colonnes jaunes pour le carburant), cela est dû au meilleur rendement de la chaîne de traction électrique par rapport aux chaînes de traction thermiques conventionnelles (surtout aux basses vitesses). Par ailleurs, si on considère la consommation globale de l'énergie primaire (tenant compte des phases de production des véhicules), la consommation totale du véhicule électrique s'approche de celle d'un véhicule diesel (comme montré dans la Figure 1.2), à cause de l'énergie importante consommée lors de la fabrication de la batterie pour le véhicule électrique (colonne en bleu).

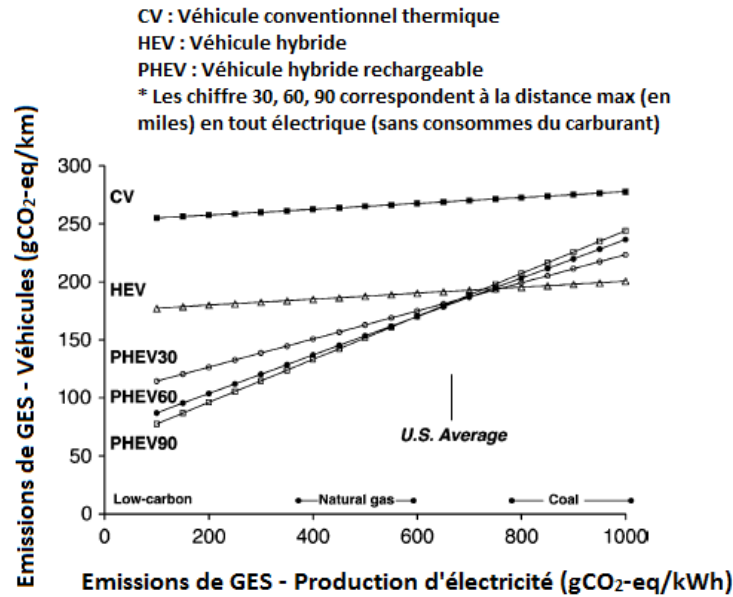


Figure 1.1 : Relation entre les émissions de GES des véhicules et le type de production d'énergie [3].

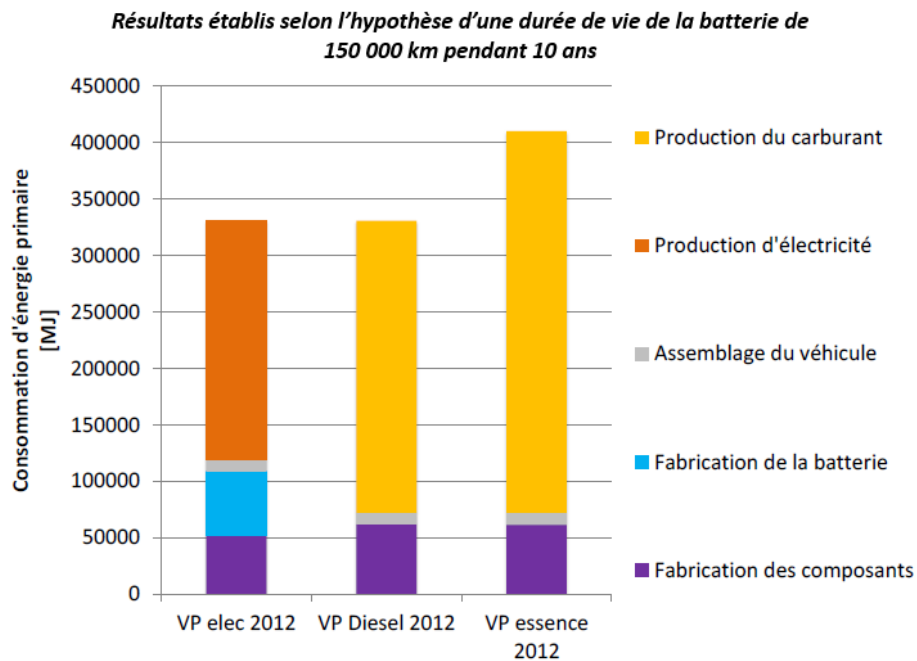


Figure 1.2 : Consommation totale d'énergie primaire des véhicules thermiques et électriques [7].

Cependant, même si la consommation énergétique totale sur un cycle de vie de véhicule électrique est proche de celle d'un véhicule diesel, la nature de l'énergie consommée est un facteur déterminant. En effet, dans le cas d'une production d'électricité peu dépendante des énergies fossiles polluantes (comme c'est le cas de la France), le véhicule électrique conduit à beaucoup moins de déplétion de ressources fossiles, comme le montre la Figure 1.3. Si l'électricité est produite par des centrales nucléaires (source d'électricité principale en France), il n'y a quasiment pas d'émissions en GES, les seuls points négatifs consistent en la gestion des déchets radioactifs, le risque de catastrophes nucléaires et l'épuisement de ressources en Uranium. Si l'électricité est produite par des ressources renouvelables « non polluantes », le véhicule électrique devient encore plus intéressant, vu que le flux d'énergie primaire est illimité et « gratuit », les seuls coûts sont donc liés à la réalisation, l'exploitation et la maintenance des centrales de production.

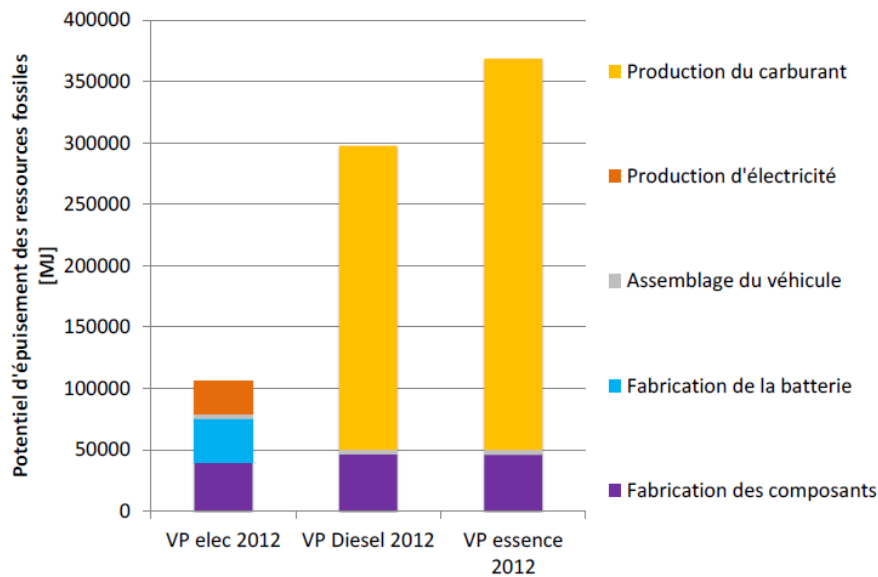


Figure 1.3 : Potentiel d'épuisement des ressources fossiles pour des véhicules thermiques et un véhicule électrique (rapport de l'ADEME considérant le mix énergétique français) [7].

Donc sur le plan environnemental, le seul moyen de réduire la dépendance du secteur de transport routier (véhicules particuliers) vis-à-vis des carburants à base de ressources fossiles polluantes est l'augmentation du taux de pénétration des véhicules électrifiés dans le marché. Bien entendu, cela ne réduit fortement les émissions de GES, liées aux véhicules particuliers, que dans les pays où l'électricité est essentiellement produite à base de sources « propres ». A ce sujet, France Stratégie (strategie.gouv.fr) a publié un rapport qui synthétise et analyse les enjeux de la réduction des émissions des voitures avec un focus sur l'union européenne [8]. La Figure 1.4, extraite de ce rapport, illustre les émissions moyennes de CO₂ sur le cycle de vie d'un véhicule thermique et électrique en Europe. On remarque que, de façon générale, le véhicule électrique (dont les émissions dépendent du mix énergétique du pays) émet moins de CO₂ que le véhicule thermique (pour tous les pays présentés dans la figure, ainsi que la moyenne de l'UE).

Parmi les pays présents dans la Figure 1.4, c'est en Allemagne que le véhicule électrique a le plus d'émissions (remplacement de la source de production nucléaire par le charbon). D'un autre côté, le pays qui présente le moins d'émissions est la Norvège, considéré comme pays exemplaire en matière d'énergie électrique propre, avec 95% de l'électricité du pays provenant des centrales hydroélectriques (source : iea.org « International Energy Agency »).

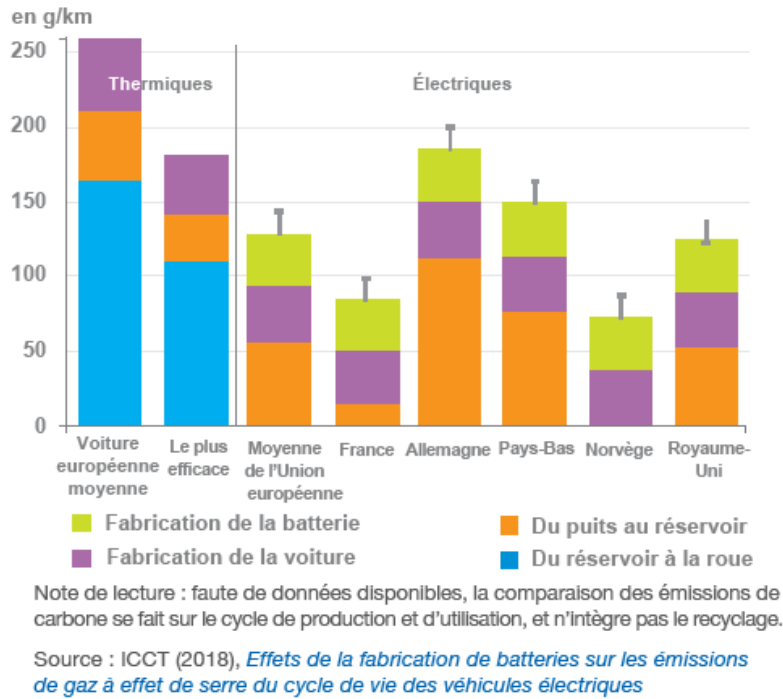


Figure 1.4 : Émissions de CO₂ sur le cycle de vie d'un véhicule électrique et thermique en Europe [8].

La Norvège a donc adopté une politique orientée « véhicules électrifiés » pendant cette dernière décennie, comme le montre la Figure 1.5. Dans cette figure, on peut constater que les véhicules Diesel (presque 70% des ventes en 2010, moins que 20% en 2018) ont cédé une bonne partie du marché de l'automobile norvégien aux véhicules électrifiés pendant entre 2010 et 2018. En 2018, on peut noter les pourcentages suivants sur les ventes des voitures en Norvège : 32% pour le tout-électrique, 18% pour l'hybride rechargeable et 10% pour l'hybride non rechargeable. En effet, ce qui a favorisé ce « bouleversement » du marché de l'automobile en faveur des véhicules électrifiés, est l'exemption de la taxe à l'importation dès le début des années 1990, puis une exemption de TVA en 2001. Ces mesures ont fait de la Norvège le seul pays où un véhicule électrique coûte moins cher que son équivalent thermique à l'achat. On peut également noter plusieurs incitations indirectes à l'usage des véhicules électrifiés, entre autres : exemption de la taxe de circulation annuelle en 1996, péages gratuits en 1997 (autoroutes, ponts, tunnels), parkings gratuits en 1999, accès aux voies de bus en 2005 et transport de véhicules en ferry gratuit depuis 2009.

Grâce à cette augmentation considérable de la part des véhicules électrifiés dans le marché automobile norvégien, les émissions moyennes en CO₂ liées aux voitures neuves dans ce pays ont considérablement chuté ces dernières années, comme le montre la Figure 1.6. Selon cette figure, la moyenne des émissions en Norvège est devenue inférieure à la moyenne de l'union européenne en 2010. Après 2010, la pente de réduction des émissions dans ce pays est sensiblement constante, contrairement à la moyenne européenne.

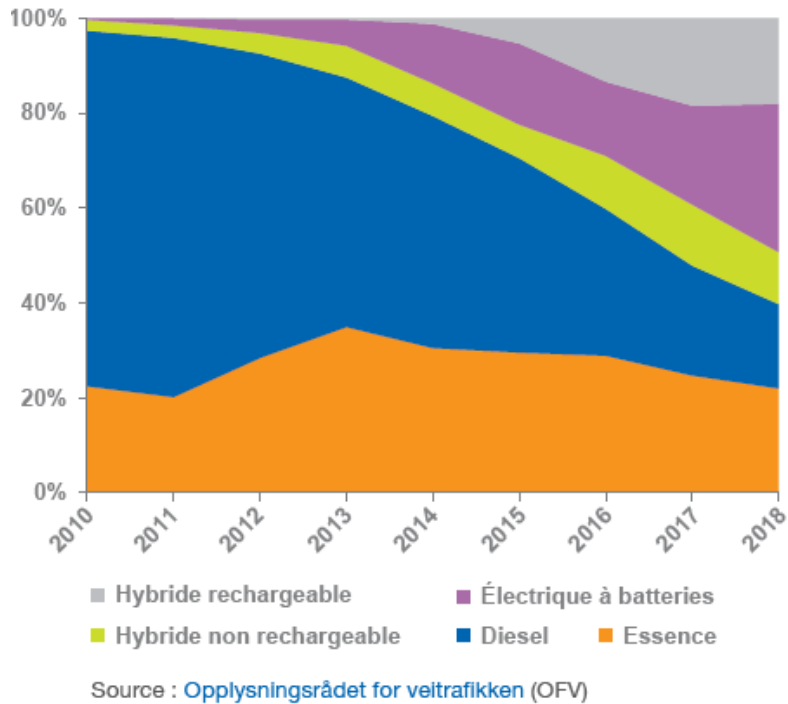


Figure 1.5 : Ventes de voitures neuves en Norvège par type de motorisation en pourcentage [8].

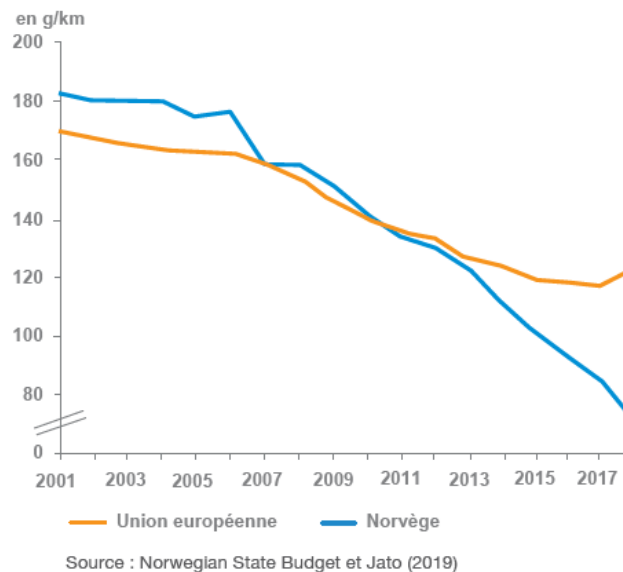


Figure 1.6 : Émissions moyennes de CO2 des voitures neuves en Norvège et en Union européenne [8].

Généralement, afin de rendre les véhicules électrifiés compétitifs sur le marché mondial de l'automobile, il est incontournable de relever trois défis majeurs :

- **Coût d'achat** : Les véhicules électriques et hybrides sont plus chers que les véhicules thermiques conventionnels, ce qui les rend moins compétitifs sur le marché de l'automobile. Néanmoins le coût évoqué correspond au prix du véhicule uniquement à l'achat. Bien sûr, si on comptabilise également le coût d'utilisation du véhicule pendant toute sa durée de vie, la réduction de consommation moyenne de carburant fossile pour les véhicules hybrides purs, et/ou l'utilisation d'une énergie électrique peu coûteuse

pour les véhicules électriques rechargeables, impliquent que les véhicules électrifiés sont en général économiques à terme, du point de vue de l'utilisateur. Néanmoins, il est compréhensible que tant que le coût d'achat est plus élevé pour ce dernier, l'achat d'un véhicule électrifié, à capacité d'investissement donné, est une prise de risque, en supposant par exemple que le surcoût soit financé par un prêt. Par conséquent, pour accélérer l'électrification il est absolument nécessaire de réduire le prix à l'achat d'un véhicule électrifié pour l'utilisateur, fiscalement et/ou en travaillant sur l'optimisation technico-économique de la chaîne de traction électrifiée. Ceci nécessite l'exploration de toutes les pistes technologiques possibles, afin d'améliorer de plus en plus les différents composants du véhicule.

- **Autonomie** : L'autonomie, généralement limitée, d'un véhicule tout électrique constitue un handicap majeur pour plusieurs usagers. En effet, avec un véhicule thermique les distances parcourues sans s'approvisionner en carburant sont généralement plus longues, et les stations de carburant sont assez répandues notamment dans les grandes villes et avec une recharge rapide. En revanche, pour les véhicules tout électrique, le contenu énergétique volumique des batteries qui sont actuellement utilisées est beaucoup plus faible que l'énergie fournie par le volume de carburant équivalent, ce qui nécessite une recharge plus fréquente [3] et avec des durées conséquentes. Par conséquent, l'amélioration de l'autonomie du véhicule, tout en minimisant le coût, constitue un défi majeur pour les constructeurs automobiles, à travers l'exploration de nouvelles pistes pour le stockage d'énergie (nouvelles technologies de batteries, piles à combustible, super condensateurs...etc.), et également l'optimisation du rendement global de la chaîne de traction électrique. Une amélioration de la mobilité peut aussi réduire les exigences en termes d'autonomie.
- **Infrastructures de recharge** : Le développement et l'expansion des véhicules électrifiés rechargeables doivent être accompagnés du déploiement des infrastructures de recharge. Actuellement les recharges se font majoritairement à domicile ou dans les lieux de travail dotés de parkings avec des bornes de recharge. Cependant, afin de réduire les contraintes sur l'utilisateur, il est indispensable de déployer à grande échelle des stations de recharge munies de bornes puissantes qui permettent des recharges « rapides ». En France, plusieurs dispositifs d'aide au déploiement des bornes de recharge pour véhicules électriques et hybrides ont été mis en place. A titre d'exemple, l'ADEME a ouvert un programme de soutien pour l'établissement de plusieurs infrastructures de recharge à l'initiative des collectivités territoriales, avec 77 projets représentant 20500 points de recharge à la fin de l'année 2015. En outre, plusieurs incitations fiscales liées à l'installation des bornes de recharge sont mises en place par le gouvernement, notamment un crédit d'impôts de 30% au profit des usagers qui s'équipent d'infrastructures de recharge est en vigueur [9].

Il est à noter que les véhicules hybrides (y compris de type rechargeable/plug-in) sont évidemment moins sujets aux deux précédents points (autonomie et infrastructure de recharge) mais c'est le surcoût et les contraintes spatiales qui sont plus fortes que pour les véhicules tout électriques.

1.1.2 Caractéristique d'une machine de traction

Dans une chaîne de traction électrique, la machine doit répondre à un cahier des charges particulier, plusieurs caractéristiques de base sont requises, on cite entre autres :

- 1) Grande densité (volumique) de puissance et de couple (Assurer un bon niveau de compacité pour l'intégration dans le véhicule) ;
- 2) Large plage de vitesse définie par celle de l'automobile et par la nature des transmetteurs mécaniques (boîte de vitesse, engrenage, train épicycloïdal, etc.) entre moteur et roues ;
- 3) Coût réduit (optimisation du coût total de l'entraînement Machine + Onduleur) ;
- 4) Aptitude à une variabilité importante des conditions de fonctionnement (régime transitoire thermique) avec un rendement élevé ;
- 5) Bonne fiabilité et robustesse selon l'environnement de roulage du véhicule ;
- 6) Minimisation du bruit acoustique, des vibrations mécaniques et du couple pulsatoire (Confort du conducteur et des passagers) [4].

La caractéristique de fonctionnement sur le plan Couple-Vitesse d'une machine de traction (en mode moteur) est composée de plusieurs zones, comme illustré dans la Figure 1.7. Par rapport à une application de l'industrie classique, la particularité de cette caractéristique consiste en l'existence de zones où il est admis par le cahier des charges mécanique que le couple maximum délivrable puisse diminuer lorsque la vitesse augmente.

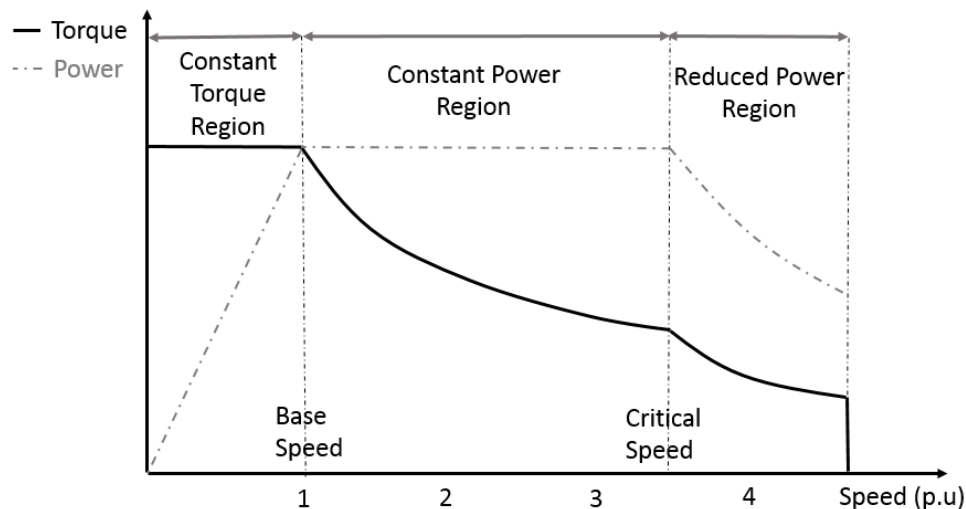


Figure 1.7 : Caractéristique théorique Couple-Vitesse d'une machine de traction [5].

Pour une chaîne de traction conventionnelle thermique, réaliser cette fonctionnalité de machine de traction à l'aide d'un moteur thermique seul n'est pas physiquement possible, car la plage de vitesse au sein de laquelle un moteur thermique peut travailler avec un bon rendement à puissance constante est bien plus faible que celle requise (par exemple de 2000 à 3000 tr/min). A cet effet, la solution historiquement adoptée est d'adjoindre au moteur thermique une boîte de vitesse. En fonction de la vitesse du véhicule, est choisi le rapport permettant de fournir le couple avec un « bon » rendement. Un exemple de caractéristique de fonctionnement d'un véhicule thermique (Modèle : OPEL CORSA 140i 3-dr) est fourni dans la Figure 1.8, où on voit comment la caractéristique est étendue grâce à l'utilisation de cinq rapports de la boîte de vitesse.

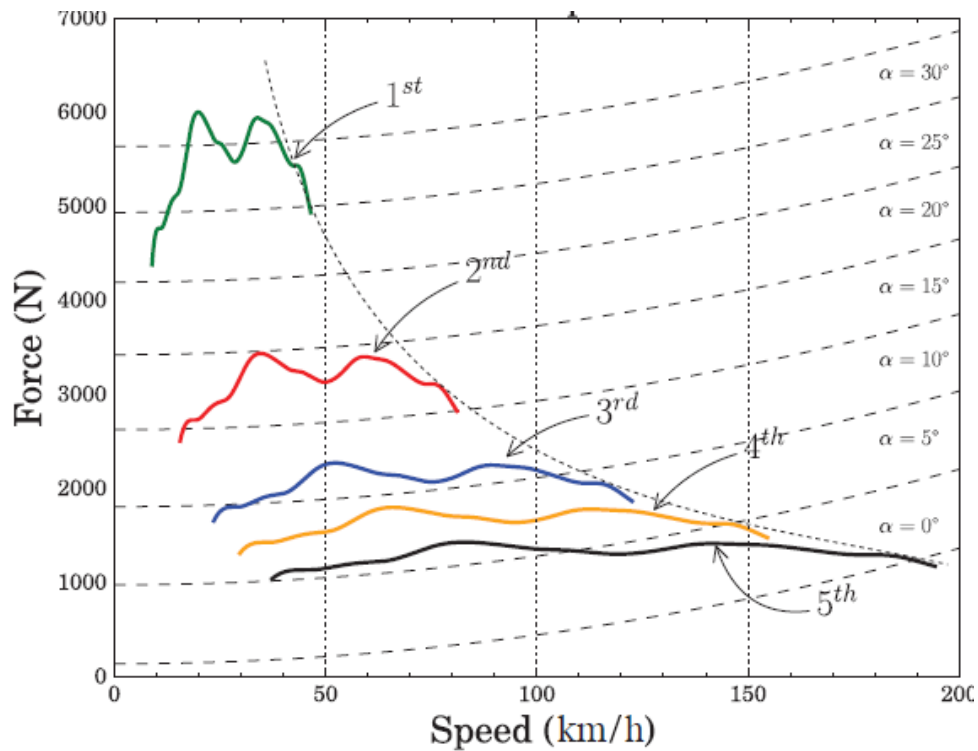


Figure 1.8 : Caractéristique de fonctionnement du véhicule thermique « OPEL CORSA 140i 3-dr » (moteur thermique + Boite de vitesse) [10].

Analysons à présent la caractéristique de la Figure 1.7 en considérant une machine électrique sans boîte de vitesse. On considérera cette machine régie par les équations constitutives suivantes (connues dans le cas d'une machine à courant continu) :

$$C = k \cdot \varphi \cdot I \quad 1-1$$

$$E = k \cdot \varphi \cdot \Omega \quad 1-2$$

Tel que : « C » est le couple, « E » est la force électromotrice, « φ » est le flux, « I » est le courant, « Ω » est la vitesse de rotation, « k » sont des coefficients constants.

On négligera dans le paragraphe ci-dessous toute chute de tension ohmique et inductive, la force électromotrice « E » est alors égale à la tension d'alimentation « U » du moteur

Pour la première région de la Figure 1.7, « Région à couple maximum constant », lorsque la vitesse « Ω » augmente, la valeur maximale « C_{\max} » du couple délivrable « $C_{\max} = k \cdot \varphi_{\max} \cdot I_{\max}$ » peut, selon « $U = E = k \cdot \varphi_{\max} \cdot \Omega$ », être maintenue constante en accroissant la valeur efficace « U » de la tension d'alimentation tout en maintenant constantes et maximales les valeurs efficaces de flux « φ_{\max} » et de courant « I_{\max} ». Dans cette zone, la puissance maximale nécessaire « $U \cdot I_{\max}$ » à fournir à la machine augmente donc quasi-linéairement avec la vitesse. Cette première région se termine en atteignant la puissance maximale « $U_{\max} \cdot I_{\max}$ », qui correspond à la vitesse dite « de base » « Ω_b » où la tension maximale « U_{\max} » qui peut être délivrée aux bornes d'une phase de la machine, par le convertisseur statique d'électronique de puissance, est atteinte.

Une fois la tension maximale « U_{\max} » atteinte « $U_{\max} = E_{\max} = k \cdot \varphi_{\max} \cdot \Omega_b$ », l'augmentation de la vitesse ne peut se faire, dans le cas des machines triphasées (ainsi que pour la machine à courant continu), que par le fonctionnement en « **défluxage** ». Ce mode de fonctionnement se fait par diminution du flux magnétique « φ » dans la machine de façon à pouvoir garder la tension statorique constante (valeur maximale « U_{\max} ») en augmentant la vitesse selon « $\varphi = \frac{U_{\max}}{k \cdot \Omega}$ ». Cette baisse de flux entraîne inévitablement la diminution du couple maximum disponible (toujours sous le même courant maximal « I_{\max} » fourni par le convertisseur statique « $C_{\max} = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{\Omega}$ »), comme illustré dans la deuxième région, dite « Région à puissance constante », de la Figure 1.7. Cette diminution de couple maximum disponible avec l'augmentation de la vitesse, se traduit sensiblement alors selon une hyperbole « $C_{\max} = \frac{P_{\max}}{\Omega}$ » ce qui est tout à fait compatible au cahier des charges d'un moteur assurant la traction d'un véhicule. Dans cette plage, étant à courant efficace maximum donné, les pertes Joule statoriques, et donc la chaleur à évacuer par le système de refroidissement, restent sensiblement¹ constantes.

Dans la troisième plage, à partir d'une vitesse dite « critique », il est nécessaire pour poursuivre le défluxage de diminuer la composante active du courant « I_q », entraînant celle de la puissance maximale et encore plus rapidement celle du couple maximum.

Pour un cahier des charges de traction, il est nécessaire que la région de fonctionnement à puissance constante, caractérisée par son ratio « CPSR » (en anglais « Constant Power Speed Ratio »), soit suffisamment grande en fonction du segment du véhicule. En se référant à la Figure 1.7, le ratio CPSR correspond au rapport entre la vitesse critique (fin de la deuxième région) et la vitesse de base (début de la deuxième région). Par exemple pour les voitures de sport, la capacité élevée d'accélération est requise même à des vitesses élevées, la région de fonctionnement à couple maximal doit donc être assez large (vitesse de base élevée), par conséquent il n'est pas nécessaire d'avoir un CPSR élevé pour atteindre la vitesse maximale du véhicule (CPSR entre 2 et 3). Néanmoins, pour les véhicules du milieu de gamme, la capacité d'accélération (donc la disponibilité du couple maximal) n'est pas nécessairement maintenue jusqu'à des vitesses élevées. Par conséquent, une vitesse de base relativement basse, soit encore un CPSR relativement important (généralement supérieur à 3) requis pour atteindre la vitesse maximale avec une puissance suffisante (en supposant l'absence d'une boîte de vitesse à plusieurs rapports). Concevoir une machine à induction pouvant être alimentée avec une large plage à puissance constante (requis par les véhicules du milieu de gamme, présente l'intérêt de limiter la puissance apparente nécessaire du convertisseur de puissance, et donc éviter un « surdimensionnement » des composants de puissance.

Comme précisé précédemment, cette plage de fonctionnement à puissance constante est classiquement obtenue par le défluxage. A priori les machines à induction sont mieux positionnées que les machines à aimants pour cette plage puisqu'il « suffit » d'imposer moins de courant magnétisant pour automatiquement défluxer. Il n'y a pas, comme c'est le cas pour les machines à aimants, à consacrer du courant à démagnétiser la machine. Néanmoins, la complexité du contrôle du flux² limite, au final, l'étendue de cette plage par rapport au cahier des charges des machines de traction pour automobile de moyenne gamme. En effet, une plage

¹ Les pertes Fer peuvent devenir conséquentes si la fréquence d'alimentation augmente trop (au-delà de 400 Hz typiquement) ainsi que des pertes dans les bobinages en cuivre, par effet de peau.

² Le contrôle vectoriel classique dit à « flux rotorique orienté » suppose une estimation du flux rotorique à partir d'un modèle de connaissance, dont les paramètres dépendent par exemple de la température et de l'état de saturation magnétique de la machine.

de défluxage large signifie un ratio élevé entre flux maximum (dans la zone à couple maximum constant) et flux minimum (à grande vitesse). Dans la plage à puissance constante le couple devient une fonction quadratique du courant (proportionnel à « $I_d \cdot I_q$ »), le flux étant lui-même dépendant de la connaissance des paramètres de la machine puisqu'il n'y a pas de capteur fournissant directement le flux magnétique.

En fait il y a tout de même une autre méthode, mais non utilisée, qui s'ajoute au défluxage, pour étendre encore plus la plage de vitesse : c'est le changement de polarité. Dans le cas d'une machine à induction triphasée, la méthode traditionnelle consiste en l'utilisation d'un type de bobinage particulier dit « de Dahlander » qui permet de changer le nombre de paires de pôles au stator avec des connexions particulières du bobinage. Ce changement est physique et nécessite donc des interrupteurs/contacteurs en plus. Avec une machine polyphasée à plus de 3 phases, il est possible de changer la polarité de la machine juste en changeant la séquence d'alimentation³ et donc sans recours à des interrupteurs/contacteurs supplémentaires, ce procédé de commutation électronique de pôles pour machines polyphasées sera développé dans les sections à venir.

1.1.3 Machines de traction dans le marché de l'automobile

Plusieurs constructeurs automobiles à travers le monde commercialisent de plus en plus des véhicules avec chaîne de traction électrique (tout électrique ou hybride). La Table 1.1 et la Table 1.2 illustrent des exemples de moteurs de traction pour des véhicules tout-électriques et hybrides déjà commercialisés [11].

Modèle de voiture	Type de moteur	Puissance max (kW)	Couple max (N.m)
Tesla model S	Moteur à induction triphasé	330	600
Renault Zoé	Moteur synchrone triphasé à rotor bobiné	65	220
Audi Etron	Moteur à induction triphasé	140	314
GM Chevy Spark EV	Moteur à induction triphasé	96	542
Nissan Leaf 2012	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	80	280

Table 1.1 : Exemples de moteurs de traction pour véhicules tout-électrique

³ Alimenter une machine à « N » phases régulières (ou symétriques) à la séquence « u » consiste à faire circuler dans deux phases consécutives (A et B, ou B et C...) des courants sinusoïdaux d'amplitude identique mais déphasés de « $u \times 2\pi/N$ ».

Modèle de voiture	Type de moteur	Puissance max (kW)	Couple max (N.m)
Toyota Prius 2004	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	50	400
Honda Accord 2006	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	12.4	136
Toyota Camry 2007	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	70	270
Lexus LS 600h 2008	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	110	300
Toyota Prius 2010	Moteur synchrone triphasé à aimants enterrés	60	207
Hyundai Sonata 2011	Moteur synchrone triphasé à aimants surfaciques	30	205

Table 1.2 : Exemples de moteurs de traction pour véhicules hybrides

Comme constaté dans les tableaux ci-dessus, les véhicules hybrides utilisent des moteurs synchrones à aimants, principalement avec des rotors à aimants enterrés, vu les avantages en termes de compacité et de plage de vitesse étendue que peuvent avoir ces machines. Les machines à induction triphasées, caractérisées par moins de densité de puissance et de couple et une plage de vitesse réduite par rapport aux machines à aimants enterrés (comme sera expliqué dans la prochaine section), sont utilisées dans des véhicules tout-électrique vu qu'il y a moins de contraintes de volume par rapport aux véhicules hybrides.

Pour les moteurs à induction utilisés en traction, on peut prendre l'exemple de l'automobile « Tesla Roadster Sport », dont le moteur est illustré dans la Figure 1.9. La caractéristique couple-vitesse de ce moteur à induction triphasé est comparée à celle d'un moteur à combustion interne de haute performance, comme illustré dans la Figure 1.10. Il peut être constaté qu'est mis en évidence que le moteur électrique de la Tesla Roadster permet avant tout d'atteindre une meilleure performance en basse vitesse.



Figure 1.9 : Machine à induction triphasée de la Tesla Roadster Sport [11].

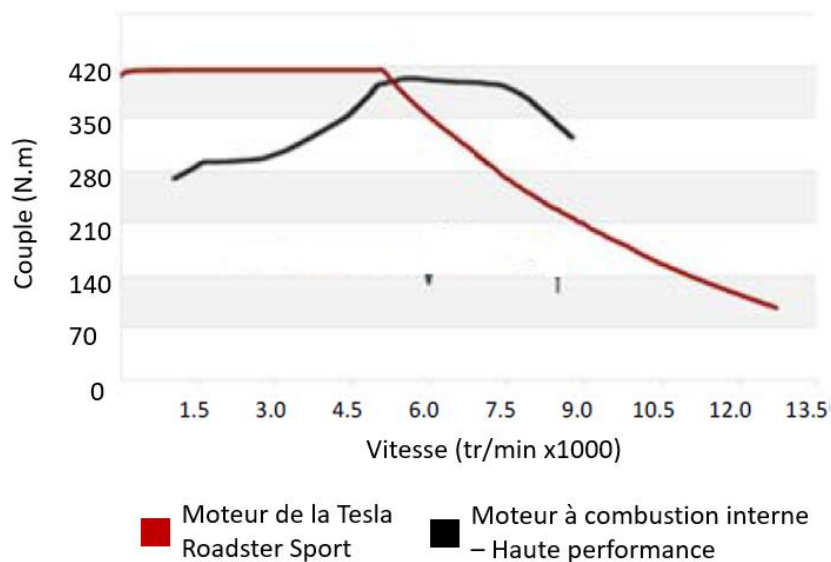


Figure 1.10 : Comparaison de la caractéristique couple -vitesse du moteur de la Tesla Roadster Sport à un moteur à combustion interne [11].

Un autre exemple de machine à induction triphasée de traction peut être considéré, qui est le modèle utilisé par General Motors, il s'agit d'une machine à induction avec un bobinage à « épingles », comme illustré dans la Figure 1.11. Le principe de ce type de bobinages est d'utiliser des conducteurs « méplats » au lieu des fils « ronds » classiques. Pour ce type de bobinages, chaque spire doit être formée par des outils spécialisés avant d'être insérée dans les encoches, comme illustré dans la Figure 1.12. Les spires sont ensuite insérées dans les encoches, et soudées entre-elles à la fin du processus. Avec ce type de bobinages le coefficient de remplissage des encoches peut être élevé par rapport au fils ronds classiques. Cependant, le nombre de conducteurs par encoches ainsi que le pas de bobinage doivent être limités.



Figure 1.11 : Machine à induction avec bobinage statorique à cage – General Motors [11].

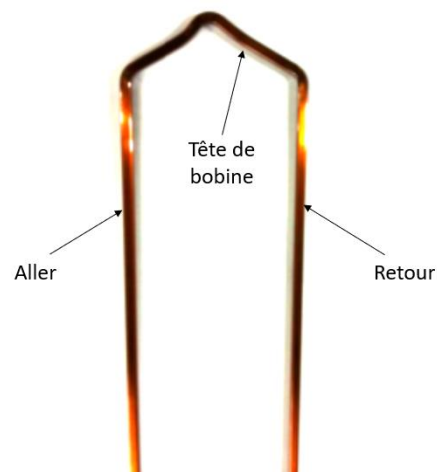


Figure 1.12 : Une spire d'un bobinage à épingles [12].

A l'instar des machines à aimants permanents, notamment utilisées pour le mode de traction électrique dans les véhicules hybrides, la Figure 1.13 illustre plusieurs topologies de rotors à aimants enterrés utilisés par certains constructeurs automobiles. De façon générale la forme des aimants largement utilisé est en « V », en monocouche ou en double-couche. On note que des travaux publiés ont montré que la topologie en V double-couche est la plus favorable pour une large plage de fonctionnement à puissance constante [13]. Avec ces machines, une partie non négligeable du couple est due à l'effet de reluctance, en plus de la partie due aux aimants.

Pour une bonne partie des machines de traction à aimants, les aimants Néodyme-fer-bore (NdFeB) sont utilisés (avec un peu de Dysprosium pour supporter les hautes températures). Ces aimants à terres rares sont caractérisés par une rémanence magnétique élevée et densité énergétique très importante, ce qui est favorable pour les machines à fort couple et grande densité de puissance.

Cependant, à cause du coût élevé des matériaux terres rares, certains constructeurs ont commencé à utiliser des aimants de la famille ferrite pour le rotor, comme General Motors qui a annoncé l'utilisation d'une machine à aimants en ferrite pour une nouvelle génération de la Chevy Volt. L'inconvénient majeur de ce matériau est sa faible densité énergétique par rapport aux terres rares, ce qui réduit la densité de puissance de la machine qui est donc moins compacte par rapport aux machines utilisant le Néodyme-fer-bore.

Un autre matériau peut être utilisé pour la fabrication des aimants, c'est le Samarium Cobalt (SmCo) qui peut bien fonctionner à des températures beaucoup plus importantes que le Néodyme-fer-bore ou la ferrite avec de plus une faible sensibilité à la température. Cependant il est caractérisé par une rémanence magnétique plus faible que les meilleurs NdFeB et une dureté plus importante ce qui rend le processus de fabrication plus complexe. Par ailleurs les deux terres rares Samarium et Cobalt sont à coût plus élevé que le néodyme « Nd ».



Figure 1.13 : Topologies de rotors à aimants pour machines de traction dans le marché de l'automobile [11].

En ce qui concerne les topologies de bobinages utilisées dans des machines de traction dans des véhicules déjà commercialisés, la majorité des constructeurs utilisent des bobinages distribués à pas diamétral, comme l'exemple de la Toyota Prius 2005 illustré dans la Figure 1.13. Peu de constructeurs utilisent des bobinages « dentaires » (c.à.d. concentrés autour des dents), du type de celui mis en œuvre en l'occurrence dans le moteur de la Hyundai Sonata 2011 (voir Figure 1.15).

Du point de vue encombrement et facilité de fabrication, les bobinages « dentaires » sont favorables grâce aux têtes de bobines plus courtes et sans enchevêtrement, ce qui réduit également les pertes Joule (car réduction des têtes de bobines). En plus, avec ces bobinages l'utilisation des conducteurs « épingles » est plus aisée, ce qui améliore le coefficient de remplissage de façon considérable. Cependant le contenu harmonique spatial de ces bobinages est en général plus riche que celui des bobinages distribués, ce qui détériore la qualité du couple, surtout pour les machines à induction, et provoquent des pertes par courant induits supplémentaires [14].



Figure 1.14 : Bobinage distribué du moteur de la Toyota Prius 2004 [11].



Figure 1.15 : Bobinage dentaire du moteur de la Hyundai Sonata 2011 [11].

1.1.4 Machine à induction triphasée dans le domaine de la traction

Comme vu dans la section précédente 1.1.3, la machine à induction triphasée est adoptée par de nombreux constructeurs automobiles, notamment pour des véhicules de type tout électrique. Ces machines sont attractives des points de vue robustesse et coût, cependant elle sont moins performantes que les machines à aimants à base de terres rares [4], [15].

Les limitations principales des machines à induction triphasées sont liées à : la faible densité de puissance et de couple ainsi que la faible plage de fonctionnement à puissance constante. Ces deux limitations rendent cette machine moins favorable pour un cahier des charges de traction automobile de milieu de segment. Par ailleurs la nécessité de magnétiser la machine en injectant en permanence un courant « magnétisant » induit logiquement une baisse du rendement et du facteur de puissance (impactant le dimensionnement de l'onduleur) dans la zone à flux constant par rapport aux machines à aimants.

1.1.4.1 Densité de puissance

Dans un véhicule automobile routier, le volume et le poids sont deux facteurs cruciaux, vu la complexité de la chaîne de traction et le grand nombre de composants dans le véhicule, à cet effet le moteur électrique doit être le plus compact possible.

Du point de vue compacité, la machine synchrone à aimants permanents, à base de terres rares, est considérée meilleure par rapport à la machine à induction, cette dernière est caractérisée par une plus faible densité de puissance et de couple, ce qui est dû à l'utilisation d'un rotor à cage en cuivre ou en aluminium à la place des aimants permanents qui créent naturellement un champ magnétique indépendamment de l'alimentation au stator. En d'autres termes, les aimants sont des éléments « actifs » qui apportent une énergie magnétisante, tandis que la cage d'une machine à induction est un élément « passif » qui ne peut pas créer un champ magnétique en l'absence d'alimentation au stator [4].

C'est donc une composante « magnétisante » des courants statoriques qui doit être utilisée pour magnétiser le rotor d'une machine à induction. Cette composante implique une section plus importante pour les bobinages statoriques en comparaison avec les machines synchrones. Il est logique que la densité énergétique des machines à induction à cage soit donc plus faible que celle des machines à aimants.

1.1.4.2 Plage de vitesse

La plage de vitesse de la machine à induction est réduite à cause de son couple maximum qui décroît fortement avec l'opération de défluxage, ce qui est expliqué par l'équation suivante [5]:

$$C_{\max} \propto \frac{p \cdot V_s^2}{f_s \cdot X_k} \propto \frac{p \cdot \phi_s^2}{L_k} \quad 1-3$$

p : Nombre de paires de pôles, V_s : Tension statorique, ϕ_s : flux magnétique, f_s : fréquence d'alimentation au stator, X_k : réactance totale de la machine, L_k inductance de fuite totale.

D'après la Figure 1.7, dans la deuxième région, qui correspond au fonctionnement à puissance constante, la diminution du flux, nécessaire pour garder la tension induite constante lorsque la vitesse augmente, entraîne une expression quadratique (type $I_d I_q$) du couple maximum. On comprend la sensibilité du contrôle du couple maximum d'autant que le flux ne peut pas être mesuré mais seulement estimé, dépendant d'une connaissance de paramètres de la machine eux-mêmes sensibles à la saturation et à la température. On peut comprendre que la plage pratique de fonctionnement à puissance constante de la machine à induction soit réduite. Selon la référence [5], cette plage peut atteindre 2 à 3 fois la vitesse de base pour une machine à induction classique

Divers travaux de recherche ont été menés pour analyser la limitation de la plage à puissance constante pour une machine à induction. En l'occurrence, les travaux publiés dans l'article [16], montrent que l'étendue de la plage de fonctionnement à puissance constante de la machine à induction est notamment liée au ratio entre l'inductance de fuite totale de la machine (stator et rotor) et l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor. Plus ce ratio est faible (inductance de fuites négligeable devant l'inductance mutuelle), plus la plage à puissance constante est large. Or, pour une machine à induction les fuites magnétiques, surtout au niveau des encoches rotoriques, sont assez importantes, ce qui justifie en d'autres termes cette limitation de la machine à induction. Selon le même article ([16]), cette plage à puissance constante est également impactée, négativement, par les résistances statorique et rotorique.

D'autres travaux ont été dédiés au développement de nouvelles méthodes de dimensionnement d'une machine à induction pour une large plage de vitesse, en optimisant l'inductance statorique [17]. Ces travaux montrent que la plage à puissance constante peut être