

Problématique du contrôle des véhicules hybrides

1.1 Les différentes architectures hybrides

Par définition, un véhicule hybride est un véhicule dans lequel sont intégrées deux sources d'énergie différentes, typiquement un moteur conventionnel (thermique) et un moteur électrique.

On définit communément trois familles d'architectures hybrides :

- Les hybrides parallèles, pour lesquels le moteur thermique fournit directement un couple aux roues,
- Les hybrides séries, où le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues,
- Les hybrides combinés, dont l'architecture reprend les caractéristiques des hybrides série et parallèle.

On décrira aussi dans ce chapitre l'architecture micro-hybride, puisque cette architecture correspond à celle du véhicule qui est étudié dans le Chapitre 6.

Selon l'architecture choisie, le véhicule hybride peut exploiter plusieurs fonctionnalités qui peuvent participer à la réduction de la consommation de carburant, ou à la récupération d'énergie électrique.

1.1.1 Les modes de fonctionnement

Le Stop-and-Start Nommé aussi Stop-and-Go ou Stop-Start selon les constructeurs, ce système permet au moteur thermique d'être démarré rapidement, et sans vibration, après un arrêt de courte durée. Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors d'arrêt aux feux rouges, ou bien dans des embouteillages. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, lorsque le moteur thermique n'est pas utilisé pendant plusieurs secondes. En contrepartie, une faible quantité d'énergie électrique est utilisée à chaque démarrage pour ramener le moteur à son régime de ralenti.

Le mode régénération Dans ce mode, le moteur électrique fournit un couple négatif, le moteur thermique fournissant alors un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur). L'énergie provenant du moteur électrique est ensuite stockée dans les batteries, afin d'être réutilisée ultérieurement.

Le mode freinage récupératif Il s'agit du fonctionnement d'un moteur électrique utilisé pour fournir un couple résistant, dans le but de récupérer l'énergie cinétique du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée.

Le mode boost Le mode boost correspond à une assistance du moteur thermique par le moteur électrique, celui-ci développant un couple positif conjointement au moteur thermique. Ce mode peut être actionné pour décharger le moteur thermique afin de placer celui-ci sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité. Il peut aussi être utilisé lors d'une importante demande de couple, lorsque le moteur thermique développe un couple insuffisant par rapport au couple de consigne.

Le mode alternateur Le mode alternateur correspond au fonctionnement classique d'un alternateur que l'on trouve sur chaque véhicule. Au lieu d'imposer un couple au moteur électrique, on impose une consigne de tension aux bornes de la batterie (ou aux bornes de la supercapacité), le moteur électrique se chargeant ensuite de réguler cette tension. Ce mode n'est pas optimal d'un point de vue énergétique, puisqu'il est utilisé, sur les véhicules traditionnels, quel que soit le point de fonctionnement du moteur thermique, même lorsque celui-ci est au ralenti.

Le mode thermique pur Il s'agit du mode classique durant lequel le moteur électrique n'est pas utilisé. Ce mode peut être utilisé pour des raisons de rendement (par exemple, lors d'un trajet sur autoroute, pour lequel le moteur thermique est utilisé à un bon rendement), ou bien parce que la batterie est déchargée.

Le mode électrique pur Il s'agit du mode pour lequel le moteur thermique est arrêté. Dans ce mode, les conséquences directes sont l'absence de bruit, l'absence de rejet de polluants ("zéro émission"), et une consommation de carburant nulle. La durée durant laquelle ce mode pourra être actif dépend de la capacité de la batterie. Si celle-ci est faible, ce mode pourra être activé durant quelques minutes tout au plus, le moteur thermique devant alors être rallumé pour ramener la batterie à un état de charge correct.

1.1.2 Architecture parallèle

Dans la configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont tout deux directement connectés à la transmission, donc aux roues. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon *parallèle* au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues.

Sur la Figure 1.1 est représenté le schéma de principe de l'architecture parallèle, ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes. La configuration générale de cette architecture est composée du moteur thermique, d'un moteur électrique, de la batterie, d'un inverseur (non représenté), et d'une transmission (boîte de vitesse et embrayage). Sur ce schéma n'ont pas été représentés le démarreur et l'alternateur, ceux-ci étant des éléments présents sur la quasi-totalité des véhicules en circulation.

L'emplacement du moteur électrique peut être différent : celui-ci peut être situé au niveau des roues avant, ou bien en liaison avec le train arrière, pour obtenir alors un véhicule à quatre roues motrices.

Une architecture hybride parallèle est complexe à contrôler, et demande un travail supplémentaire pour l'intégration physique des sources de puissance. En effet, sur l'architecture hybride parallèle, les deux sources de couple (moteur thermique et moteur électrique) sont directement reliées au train moteur, la consigne de couple devant donc être répartie à chaque instant entre les deux sources de couple. Néanmoins, des gains non négligeables peuvent être obtenus, même en utilisant des composants électriques de faible puissance et de faible capacité. Aussi, ces gains permettent de compenser le surcoût de cette architecture et le surpoids lié aux batteries et au moteur électrique.

1.1 Les différentes architectures hybrides

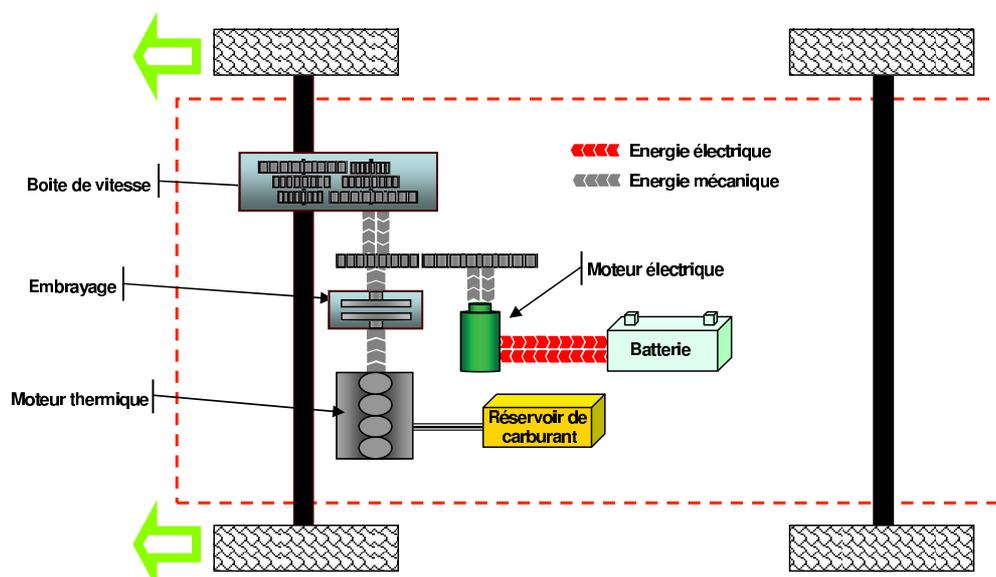


FIG. 1.1: Schéma de principe de l'architecture *hybride parallèle*.

1.1.3 Architecture micro-hybride

L'architecture micro-hybride correspond à une version allégée de l'hybride parallèle, pour laquelle le moteur électrique reste constamment mécaniquement lié au moteur thermique. La liaison pourra s'effectuer de diverses manières : par engrenage, ou bien par courroie.

La Figure 1.2 représente l'architecture micro-hybride, composée d'un moteur thermique et d'un moteur électrique en liaison directe avec le moteur thermique.

C'est en fait la forme la plus simple des différentes architectures hybrides, puisque les véhicules micro-hybrides sont essentiellement des véhicules conventionnels équipés d'un alerno-démarrreur, permettant notamment de profiter du Stop-and-Start et éventuellement du freinage récupératif. Si les gains que l'on peut obtenir sont les plus faibles parmi toutes les architectures (ils ne dépassent guère 10%), c'est aussi celle dont l'implantation des organes dans le véhicule, tels que la batterie et le moteur électrique, est la plus simple.

Les inconvénients majeurs de cette architecture résident dans sa définition même : il n'est pas possible d'utiliser le moteur électrique seul pour la propulsion du véhicule, notamment à faible charge lorsque l'efficacité du moteur thermique est faible. De plus, l'énergie qui peut être obtenue lors d'un freinage récupératif sera amputée par le couple de frottement du moteur thermique (pertes par pompage et frottements moteur), puisque le moteur thermique ne peut être désaccouplé du moteur électrique, ce qui réduit la quantité d'énergie récupérable.

Remarque 1.1.1. *Les véhicules munis du Stop-and-Start, et n'exploitant pas la régénération par freinage récupératif ou par moteur thermique, peuvent ou non être considérés comme des véhicules hybrides en tant que tels. En effet, s'ils sont munis d'un moteur électrique pour l'entraînement du moteur thermique (dont la puissance est supérieure à celle d'un démarreur classique), le moteur électrique ne participe pas, en revanche, à la traction "hybride" du véhicule. Cette question de l'appartenance – ou non – des véhicules uniquement munis du Stop-and-Start au monde des véhicules hybrides a été abordée par [Scordia, 2004], et ne sera pas traitée ici.*

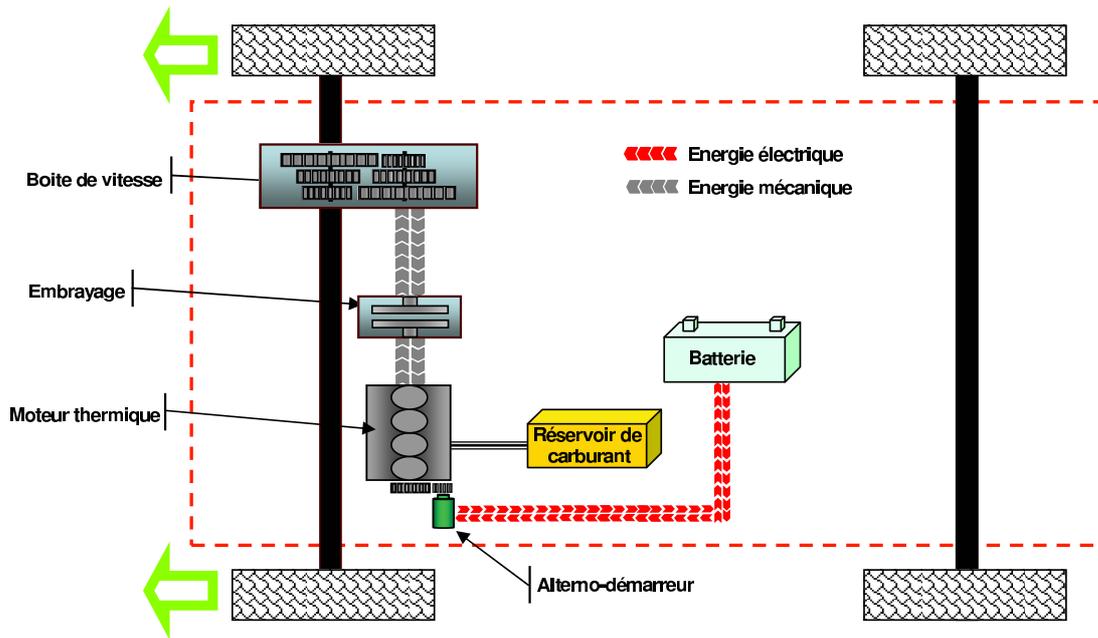


FIG. 1.2: Schéma de principe de l'architecture *micro-hybride*.

1.1.4 Architecture série

Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique est donc dimensionné pour pouvoir assurer seul la traction du véhicule, selon la demande de couple du conducteur.

La Figure 1.3 schématise le fonctionnement d'un véhicule hybride série. Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux. Cette configuration permet à la batterie d'être rechargée soit :

- par le moteur thermique, via la génératrice. Dans ce cas, le moteur thermique est contrôlé de manière à fonctionner à son rendement optimum.
- par le moteur électrique, qui sera alors utilisé en mode générateur, lors d'un freinage récupératif.

L'intérêt de cette architecture réside dans la capacité à pouvoir faire fonctionner le moteur thermique au point de fonctionnement souhaité, quelles que soient les conditions extérieures telles que la vitesse du véhicule ou la demande de couple, puisque le moteur thermique est complètement déconnecté du train moteur. En revanche, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade de rendement du train moteur est assez défavorable à la réduction de l'énergie consommée, c'est pour cette raison que les véhicules hybrides série dépassent rarement le stade du prototype.

1.1.5 Architecture combinée

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Appelée aussi *hybride parallèle à dérivation de puissance*, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. La Figure 1.4 schématise le fonctionnement d'un hybride combiné.

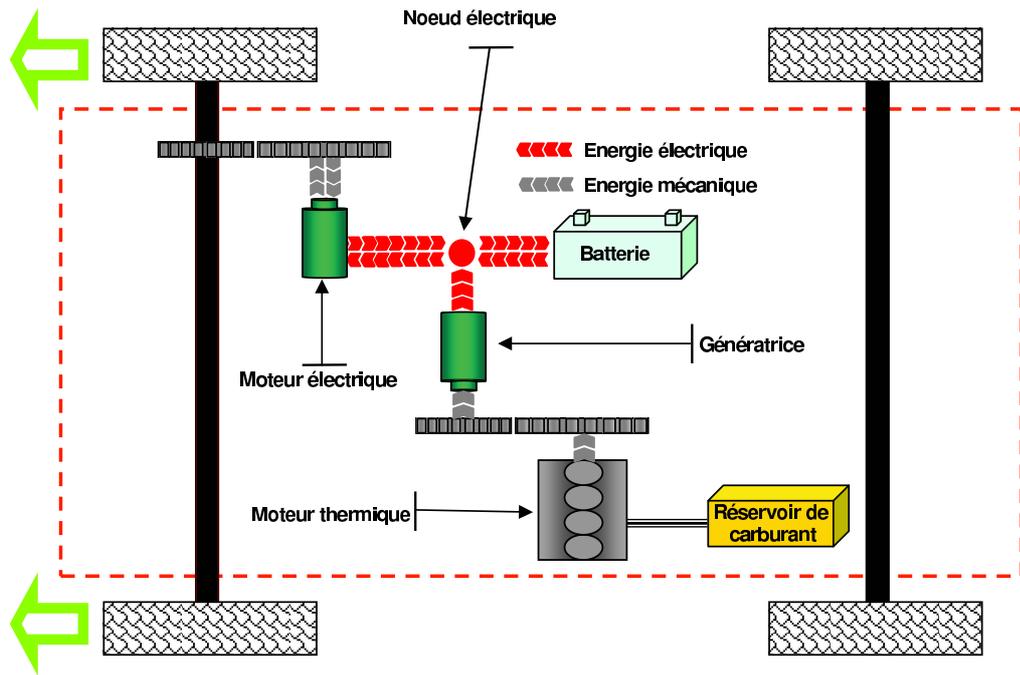


FIG. 1.3: Schéma de principe de l'architecture *hybride série*.

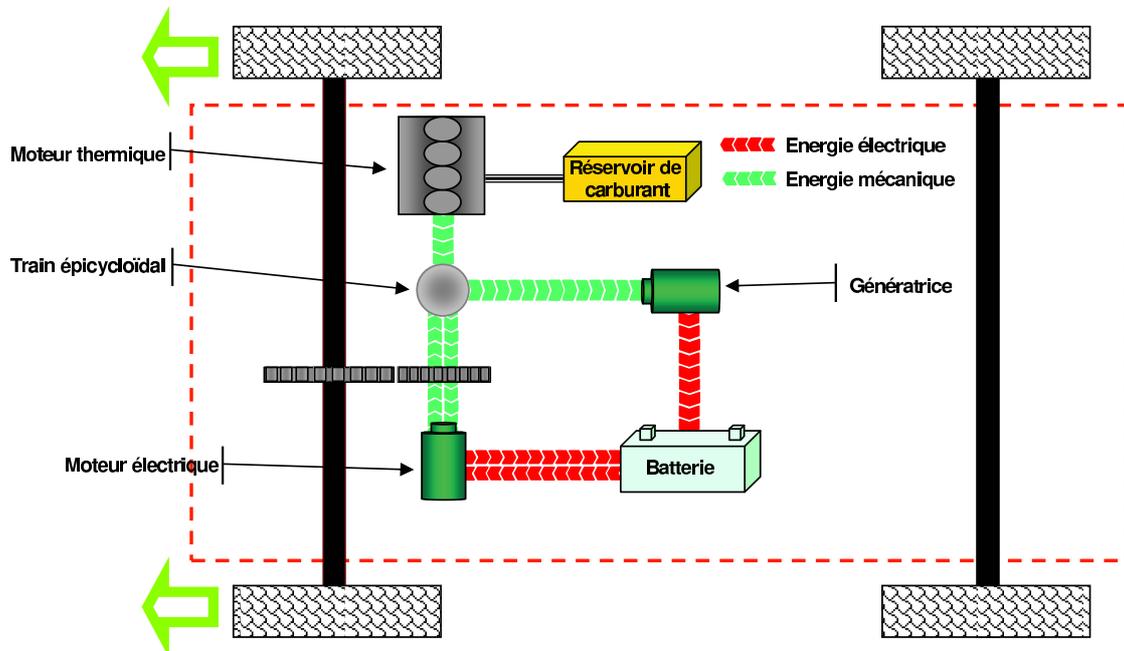


FIG. 1.4: Schéma de principe de l'architecture *hybride combinée*, type Prius.

1.1.6 Autres architectures

On trouve quelques autres architectures, qui restent souvent au stade de prototypes, mais dont le potentiel est intéressant.

- Architecture de type parallèle, avec moteurs dans les roues. Plusieurs constructeurs ont déjà présenté des prototypes de véhicules hybrides dont deux moteurs électriques, ou davantage, sont localisés dans les roues. D'un point de vue énergétique, cette solution est idéale, puisque les moteurs sont situés au plus près du point de transmission finale de la puissance, qui se trouve au niveau du point de contact entre le pneu et la route. Notamment, cet emplacement permet d'éviter de subir les rendements des transmissions, qui réduisent sensiblement l'énergie récupérable. Parmi les autres intérêts de cette architecture, chaque roue peut être contrôlée indépendamment les unes des autres, ce qui peut être intéressant pour l'utilisation de l'ESP (*Electronic Stability Program*, système de stabilisation du véhicule en courbe, agissant sur les systèmes de freinages pour corriger la trajectoire du véhicule).
- Les architectures hébergeant plusieurs trains épicycloïdaux, permettant une variation continue des rapports.

1.1.7 Les véhicules hybrides en France

Depuis quelques années, le marché des véhicules hybrides s'est largement développé. Bien que les constructeurs – notamment français – soient encore timides quant au nombre de modèles proposés, on voit régulièrement présentés des prototypes de véhicules hybrides lors des salons automobiles.

Sur le marché français, on compte aujourd'hui quatre modèles disponibles à la vente :

- La Honda Civic IMA (Integrated Motor Assist) est sortie en France en 2004, suite à la présentation de la Honda Insight au salon de Francfort de 1999. Son système IMA lui permet de disposer de l'assistance du moteur électrique lors des demandes importantes de puissance, de récupérer de l'énergie aux freinages, et de profiter du Stop-and-Start à l'arrêt. C'est donc une architecture micro-hybride.
- La Toyota Prius. Sortie en décembre 1997 au Japon, puis en 2000 aux USA et en Europe, la Prius fut le premier véhicule hybride de série. C'est aujourd'hui le véhicule hybride le plus connu dans le monde, et aussi le plus vendu : à ce jour, plus d'un million de Prius ont été vendues à travers le monde.
L'originalité de l'architecture de la Prius provient de son train planétaire, ou train épicycloïdal. Celui-ci permet de choisir librement la puissance fournie par le moteur thermique, le surplus de puissance (par rapport à la demande du conducteur) étant alors absorbé par la génératrice.
- La C3 Stop-and-Start est sortie en France en 2004. Équipée d'un alerno-démarrreur lui permettant de couper le moteur lors des embouteillages (système Stop-and-Start), elle était toutefois incapable de profiter du freinage récupératif et de la régénération par le moteur thermique. D'un prix de vente de 15350 euros, ce véhicule n'a pas eu le succès escompté, le dispositif Stop-and-Start n'étant disponible que sur les véhicules équipés d'une boîte mécanique robotisée Sensodrive, alors que les français restent en général attachés aux boîtes de vitesse manuelles, son prix était de plus jugé trop élevé.
- La Lexus RX400H. Ce véhicule possède une traction intégrale grâce à ses deux moteurs électriques. A l'avant, on trouve un moteur électrique avec une génératrice pour la récupération d'énergie, ainsi qu'un moteur thermique. Ceux-ci sont liés avec un train planétaire, suivant le même schéma que la Toyota Prius. A l'arrière, un second moteur électrique permet d'entraîner les roues arrière, sans liaison mécanique entre les deux essieux. Le surpoids des batteries est ainsi compensé par la disparition de la transmission. En cycle mixte, les émissions de CO₂ sont de seulement

1.2 La problématique de contrôle optimal

192 g/km, pour une consommation de 8.1 l/100km, contre 262 g/km et une consommation de 9.9 l/100km pour un modèle de même catégorie, la Volkswagen Touareg V6 3.0 TDI. Le prix de cette Lexus réserve néanmoins ce véhicule hybride aux clients les plus fortunés, le modèle de base se situant à un prix dépassant les 50000 euros.

Aujourd'hui, plusieurs constructeurs ont annoncé la sortie de véhicules munis du Stop-and-Start : Renault s'engage à appliquer ce système sur tous ses véhicules d'ici 2009-2010. Fiat ajoutera aux catalogues de la Panda et de la 500 une version avec alerno-démarrreur à l'automne 2008. PSA a annoncé début 2008 que son système Stop-and-Start sera généralisé à l'ensemble de sa gamme le plus tôt possible, tablant sur des ventes d'un million de véhicules munis du Stop-and-Start en 2011.

Ce système est donc adopté progressivement par l'ensemble des constructeurs, puisqu'il constitue une solution peu coûteuse permettant de réduire la consommation de carburant.

1.2 La problématique de contrôle optimal

Sur un véhicule à motorisation traditionnelle, le couple fourni par le moteur thermique dépend au premier ordre de la quantité de carburant injectée. Certains actionneurs influent eux aussi sur le couple fourni par le moteur thermique (l'avance à l'allumage, dans le cas des moteurs à allumage commandé, les angles d'ouverture et de fermeture des soupapes), mais restent davantage utilisés pour limiter les fumées et les rejets de polluants.

Sur les véhicules hybrides, la présence d'un ou de plusieurs moteurs électriques amène plusieurs degrés de liberté dans la façon dont une consigne de couple, demandée par le conducteur, peut être réalisée. Ces degrés de liberté peuvent être utilisés pour remplir différents objectifs, parfois complémentaires :

- La minimisation de la consommation de carburant, et par là même des émissions de CO₂, en utilisant de manière adéquate le(s) moteur(s) électrique(s). Intuitivement, c'est lorsque l'efficacité du moteur thermique est faible que le moteur électrique pourrait prendre sa place.
- La réduction des rejets de polluants (CO, NO_x, HC). Ces derniers peuvent être diminués en optimisant la répartition de couple des différents moteurs, mais surtout en réduisant la durée de montée en température du catalyseur sur moteur essence, un catalyseur étant inefficace tant qu'il n'a pas atteint sa température idéale.
- L'absence des émissions de polluants et de la consommation de carburant, obtenue par l'arrêt du moteur thermique grâce à l'utilisation du mode électrique pur. Le bruit du véhicule est alors grandement réduit, et limité au seul bruit de roulement des pneus sur la route. Très intéressant dans les centres-villes, la durée d'utilisation de ce mode est néanmoins limitée par la capacité de la batterie.

Parmi ces possibilités, la réduction du bruit ne donne pas lieu à la résolution d'un problème de contrôle, le mode purement électrique pouvant être actionné directement par le conducteur. Ce mode peut aussi être une conséquence de la loi de gestion d'énergie.

La réduction du temps de montée en température du catalyseur peut être obtenue simplement en augmentant le couple du moteur thermique durant les premières secondes de fonctionnement, afin d'augmenter la température des gaz d'échappement.

La réduction de la consommation, quant à elle, représente une vraie difficulté : on doit en effet choisir quand et de quelle façon utiliser le moteur électrique, et s'assurer que la batterie (ou tout autre système de stockage) garde un état de charge suffisant tout au long du cycle.

Ce problème de gestion efficace des sources d'énergie peut s'écrire comme un problème d'optimisation. On distinguera alors deux problèmes différents : la minimisation de la consommation sur cycle, et la minimisation de la consommation en temps-réel.

1.2.1 Minimisation de la consommation de carburant sur cycle normalisé

L'intérêt principal d'un véhicule hybride provient de sa capacité à pouvoir consommer moins de carburant, comparé à un véhicule équivalent équipé seulement d'un moteur thermique. Cette possibilité existe grâce à la présence de deux sources d'énergie distinctes, ces deux sources possédant chacune une zone d'efficacité maximale qui leur est propre.

De plus, le véhicule hybride peut profiter d'une partie de l'énergie cinétique du véhicule lors d'un freinage récupératif, lui permettant de récupérer une certaine quantité d'énergie gratuite et de la stocker, celle-ci étant normalement dissipée par effet Joule dans le système de freinage.

La détermination de la consommation de carburant d'un véhicule s'effectue sur un cycle de conduite. Le conducteur du véhicule doit suivre une consigne de vitesse, donnée en fonction du temps, les rapports de la boîte de vitesse étant en général imposés le long du cycle (lorsque le véhicule est équipé d'une boîte mécanique). L'évaluation de la consommation de carburant, et des rejets de polluants permet ensuite de pouvoir comparer ces résultats avec ceux d'autres véhicules ayant suivi le même cycle.

Dans ce mémoire, on utilisera un cycle de référence, le cycle NEDC : New European Driving Cycle. Il est constitué de 4 séquences répétées du cycle ECE-15, constituant la partie urbaine, puis d'une partie extra-urbaine à l'aide d'une séquence du cycle EUDC (Extra-Urban Driving Cycle). La Figure 1.5 représente l'allure du cycle NEDC.

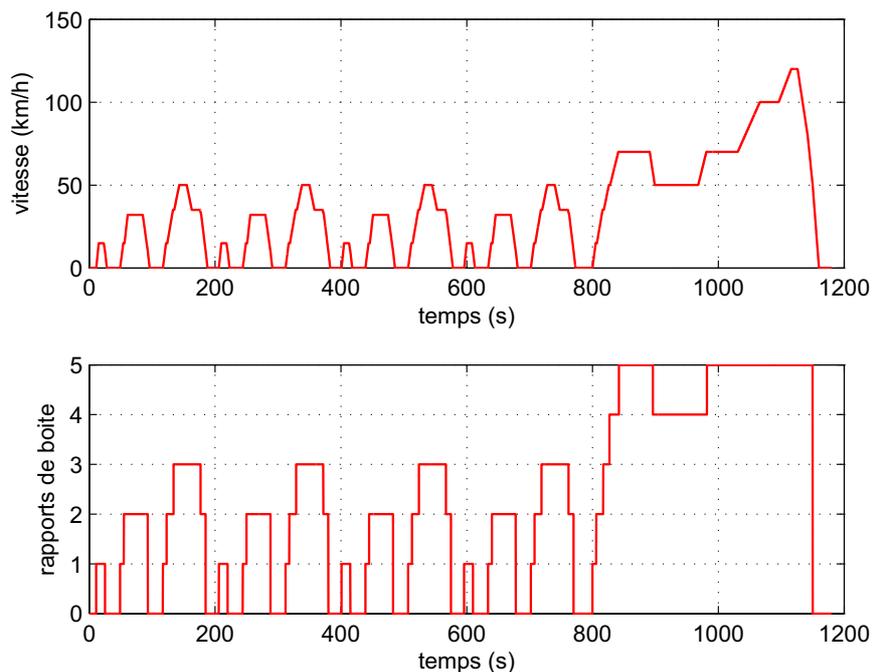


FIG. 1.5: Cycle NEDC : Vitesse véhicule (haut) et rapports de vitesse imposés (bas).

Le cycle NEDC se distingue du cycle MVEG (dont la consigne de vitesse est identique) par ses conditions initiales au départ du cycle : le cycle NEDC nécessite que le véhicule démarre à froid, sans que le moteur ait été démarré au préalable. Cette condition est très importante, étant donné que les véhicules actuels polluent le plus lors des premières secondes qui suivent la mise en route du moteur thermique, d'une part à cause de la mauvaise combustion due à une température trop basse, et d'autre part à cause du délai nécessaire à l'amorçage du catalyseur sur véhicule à allumage commandé.

1.2 La problématique de contrôle optimal

Ce cycle est directement utilisé pour l'homologation des véhicules aux normes Euro 4, et à partir de septembre 2009, aux normes Euro 5. Il constitue donc un passage obligatoire pour l'évaluation de la consommation de carburant. Cependant ce cycle est peu représentatif d'un trajet urbain. Ainsi, on considérera aussi dans ce mémoire le cycle Artemis urbain (voir [André, 2004]), correspondant à cycle de conduite réelle, donc bien plus représentatif d'un fonctionnement classique du véhicule.

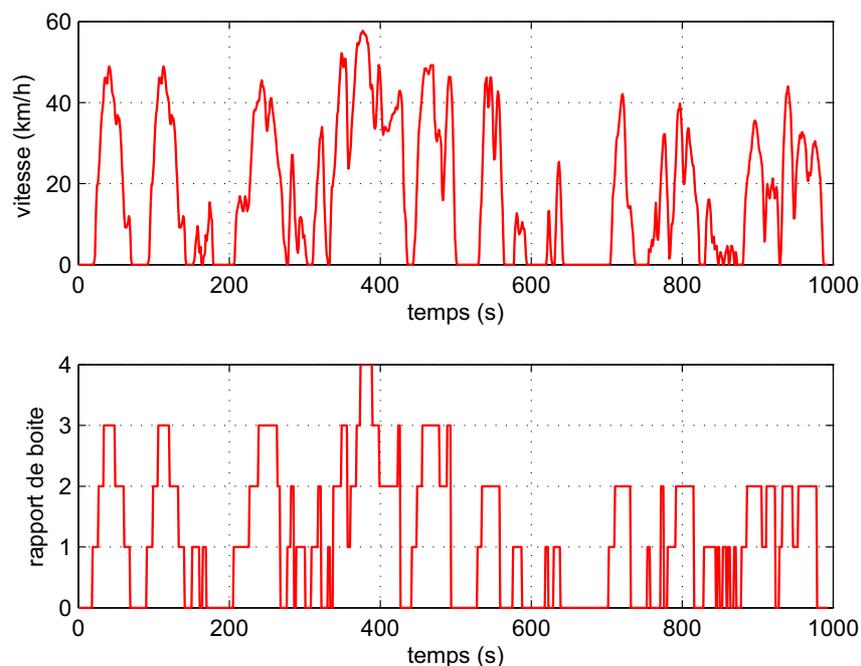


FIG. 1.6: Cycle Artemis : Vitesse véhicule (haut) et rapports de vitesse imposés (bas).

La minimisation de la consommation de carburant sur cycle nécessite de connaître les efficacités des différentes sources d'énergies du véhicule. Pour cela, on fait donc appel à des modèles physiques, ou bien à des cartographies.

Dans le cadre de l'évaluation et de la minimisation de la consommation de carburant de véhicules hybrides, ces derniers doivent remplir une condition supplémentaire : les états de charge des éléments de stockage d'énergie électrique (des batteries en général), mesurés au début et à la fin du cycle, doivent être sensiblement égaux. Cette condition assure d'avoir une balance énergétique nulle au niveau du stockage de l'énergie électrique, c'est à dire d'avoir une consommation globale qui ne provienne que de l'énergie contenue dans le carburant.

Ce problème de minimisation peut être vu comme un problème de contrôle optimal : déterminer quelle est la consommation minimale de carburant d'un véhicule hybride, sous la contrainte de fonctionnement du système électrique. La condition qui impose d'avoir un état de charge final proche de l'état de charge initial peut s'écrire comme une contrainte sur la valeur finale de l'état de charge, l'état de charge initial étant alors lui aussi fixé.

1.2.2 Problème en temps-réel où le futur n'est pas connu

S'il est possible de connaître la loi de commande optimale sur un cycle donné en résolvant directement le problème d'optimisation, il n'est pas possible d'appliquer les mêmes techniques pour la loi de gestion d'énergie temps-réel.

Sur cycle connu, la commande optimale déterminée après optimisation tient compte – à chaque instant t – de ce que se passe entre l’instant t et la fin du cycle : si un grand freinage survient à la fin du cycle, la commande optimale choisira de consommer de l’énergie électrique en utilisant le moteur électrique, ayant la connaissance du freinage final durant lequel le freinage récupératif pourra être activé.

Sur une utilisation en temps-réel, le trajet que suivra le conducteur n’est pas connu à l’avance (si l’on exclut toute information qui pourrait être obtenue par un GPS, par exemple). Ainsi, il n’est pas possible de déterminer une loi de commande qui soit optimale d’un point de vue global, et qui nous assure d’obtenir un bilan batterie nul à la fin d’un trajet. On parle alors de loi sous-optimale.

1.3 Définition des classes de problèmes d’optimisation étudiés

Le problème d’optimisation correspond à la minimisation de la consommation de carburant d’un véhicule hybride sur un cycle connu à l’avance, tout en ayant une balance énergétique nulle au niveau de la batterie entre le début et la fin du cycle. Ce problème peut donc être vu comme un problème de commande optimale. Il s’agit à partir d’un état initial fixé, d’atteindre un certain état final, tout en minimisant un critère.

Le système dynamique considéré dans ce problème de commande optimale est la batterie qui fournit l’énergie nécessaire au moteur électrique. L’état de charge de la batterie, noté x , constitue donc la variable d’état de ce problème de commande optimale. La consommation instantanée de carburant est notée L , et la commande définissant la répartition de couple (ou de puissance) entre les moteurs électrique et thermique est notée u . On considère aussi des contraintes de bornes sur la commande u , notées u_{\min} et u_{\max} dues aux saturations des actionneurs ; les contraintes de bornes sur la variable d’état du système dynamique sont quant à elles notées x_{\min} et x_{\max} .

Les classes de problèmes de contrôle optimal qui sont étudiés dans ce mémoire sont définies ci-après.

Problèmes de type (1.1) (hors-ligne)

La première classe de problèmes correspond au cas d’un véhicule hybride dont le moteur thermique reste constamment allumé. On souhaite connaître la consommation de carburant optimale de ce véhicule sur un cycle donné. Cette consommation peut être minimisée grâce à l’utilisation d’un moteur électrique alimenté par une batterie, celle-ci ayant une équation dynamique de la forme $\dot{x}(t) = f(t, u(t))$, et dont la dépendance de f en x est faible (et supposée nulle ici). Le problème d’optimisation s’écrit

$$\begin{cases} \min_u \int_0^T L(t, u(t)) dt \\ \dot{x}(t) = -s(t)(1 - u(t)) = f(t, u(t)), & x(0) = x(T) = x_0 \\ u_{\min}(t) \leq u(t) \leq u_{\max}(t) \\ x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

avec $\forall t \in [0, T]$, la fonction à minimiser $u \mapsto L(t, u)$ est croissante, la commande $t \mapsto u(t)$ et ses bornes $t \mapsto u_{\min}(t)$ et $t \mapsto u_{\max}(t)$ sont continues par morceaux (KC^0), et la fonction $t \mapsto s(t)$ est elle aussi continue par morceaux. L’état initial $x(0)$ est donné par une constante x_0 .

La fonction s représente le cycle suivi, c’est à dire qu’à une consigne de vitesse du véhicule (donnée par le cycle) correspond un régime du moteur électrique, modulo le rapport de boîte (si présence d’une boîte de vitesses entre le moteur et les roues). Ainsi, s est telle que $s > 0$ si le véhicule accélère ou est à vitesse constante, et $s \leq 0$ si le véhicule freine.

Dans ce problème, les dépendances en temps de $L(t, u)$, $s(t)$, $u_{\min}(t)$, $u_{\max}(t)$, $x_{\min}(t)$ et $x_{\max}(t)$ proviennent donc du cycle que suit le conducteur à chaque instant t . La présence d’une boîte de vitesses sur

1.3 Définition des classes de problèmes d'optimisation étudiés

le véhicule, dont le rapport de nature discrète intervient dans $L(t, u)$, $s(t)$, $u_{\min}(t)$ et $u_{\max}(t)$, peut donc provoquer des discontinuités, ce qui explique que les fonctions soient continues par morceaux.

La résolution de ce problème dans un cas simple est étudiée dans la section 2.3.1, tout d'abord dans le cas sans contrainte, puis en considérant successivement les contraintes sur la commande puis sur l'état. Si ce problème peut être facilement résolu lorsqu'on introduit des contraintes sur la commande, on montre que l'introduction des contraintes sur l'état est plus problématique pour l'obtention d'une solution.

Selon la commande $u(t)$ et le signe de $s(t)$, on peut déduire l'évolution de $\dot{x}(t)$, donc de l'état de charge de la batterie :

- $s(t) > 0$ et $u(t) = 0$: mode électrique pur, $\dot{x}(t) < 0$, le moteur thermique reste allumé et consomme du carburant (mais ne fournit plus de couple).
- $s(t) > 0$ et $u(t) < 1$: mode moteur ou boost, $\dot{x}(t) < 0$ (la batterie se décharge, le moteur électrique fournit un couple).
- $s(t) > 0$ et $u(t) = 1$: mode thermique pur, $\dot{x}(t) = 0$
- $s(t) > 0$ et $u(t) > 1$: mode régénération $\dot{x}(t) > 0$ (la batterie se recharge grâce au moteur thermique).
- $s(t) < 0$ et $u(t) < 1$: mode freinage récupératif, $\dot{x}(t) > 0$ (la batterie se recharge grâce à l'énergie cinétique du véhicule).
- $s(t) < 0$ et $u(t) = 1$: freinage assuré par le système de freinage mécanique (frottement des plaquettes sur les disques de frein), $\dot{x}(t) = 0$.

Problèmes de type (1.2) (hors-ligne)

On suppose maintenant que le véhicule possède une fonctionnalité supplémentaire : le moteur thermique peut être arrêté pendant une certaine durée, lors de l'utilisation du Stop-and-Start, ou du mode électrique pur. Le redémarrage du moteur engendre une consommation d'énergie liée à l'entraînement de la masse inertielle du moteur thermique, celui-ci étant amené d'un régime nul jusqu'au régime de ralenti.

Ce second problème d'optimisation fait intervenir une variable d'état discrète notée $r(t) \in \{0, 1\}$, dont le rôle est de représenter l'état du moteur thermique : allumé ou éteint. Il s'agit donc d'arrêter et de remettre en route le moteur thermique aux "bons moments" pour minimiser la consommation globale.

Ce problème d'optimisation s'écrit

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{u,r} \left\{ \int_0^T r(t)L(t,u(t))dt + \int_0^T C_0 \max(0,\dot{r}(t))dt \right\} \\ \dot{x}(t) = -s(t)(1-r(t)u(t)) = f(t,u(t),r(t)), \quad x(0) = x(T) = x_0 \\ u_{\min}(t) \leq u(t) \leq u_{\max}(t) \\ x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t) \\ r(t) \in \{0, 1\}. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Le terme $\int_0^T \max(0,\dot{r}(t))dt$ représente ainsi le nombre de redémarrages sur le cycle, le coût $C_0 > 0$ étant alors représentatif de la dépense énergétique d'un démarrage. Le terme \dot{r} est donc un dirac, qui est positif si $\dot{r} > 0$, et négatif si $\dot{r} < 0$. On vérifie donc que lors d'un démarrage, la variable discrète $r(t)$ passe instantanément de 0 à 1, le véhicule dépensant alors la quantité d'énergie C_0 ; lors d'un arrêt du moteur, r passe de 1 à 0, le terme $C_0 \max(0,\dot{r}(t))$ est donc nul, l'arrêt du moteur thermique ne consommant pas d'énergie.

C'est donc une façon compacte d'écrire le problème de la minimisation de la consommation de carburant sur cycle, en prenant en compte un coût C_0 à chaque redémarrage du moteur thermique. La résolution de ce problème est abordée dans les sections 2.3.2 et 3.3.5.

Problèmes de type (1.3) (temps-réel)

Le troisième problème traité correspond à la minimisation de la consommation de carburant en temps-réel au temps t . L'idée étant de minimiser la consommation globale de carburant d'un trajet futur entre t et $+\infty$, on peut écrire ce problème comme

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{u,v} \left\{ \int_t^{+\infty} r(\tau)L(\tau,u(\tau))d\tau + \int_t^{+\infty} C_0 \max(0,\dot{r}(\tau))d\tau \right\} \\ \dot{x}(t) = -s(t)(1 - r(t)u(t)) = f(t,u(t),r(t)), \quad x(t) = x_t \\ u_{\min}(t) \leq u(t) \leq u_{\max}(t) \\ x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t) \\ r(t) \in \{0,1\}. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

où l'instant t représente l'instant auquel une commande est appliquée en temps-réel par le contrôleur.

Dans ce problème, c'est donc le conducteur qui décide à chaque instant $t \in [0, +\infty]$ quelle sera la dépendance en temps, et quelle sera l'allure de $s(t)$ (et de la consommation qui dépend elle aussi du cycle). On peut donc considérer que l'information est entièrement connue entre 0 et t (puisque c'est le passé), les intentions du conducteur donc le cycle étant inconnu entre t et $+\infty$ (puisque c'est le futur).

Les façons de traiter ce type de problèmes sont énumérées dans le Chapitre 5, l'une d'elles étant appliquée en simulation et sur un véhicule réel dans le Chapitre 6.

Première partie

Optimisation hors-ligne

Introduction

Les problèmes d'optimisation du type (1.1) et (1.2) peuvent être résolus suivant différentes approches, dédiées à la résolution de problèmes d'optimisation dynamique ([Bertsekas, 2001], [Bryson and Ho, 1975], [Sethi and Thompson, 2006]). On distingue notamment :

- les méthodes directes. Elles requièrent la discrétisation des commandes $u(t)$ selon une grille $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = T$.
- la programmation dynamique, qui découle d'une discrétisation de l'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman.
- les méthodes indirectes, basées sur le principe de Pontryagin.

Certaines méthodes se prêtent assez bien à la résolution du problème en présence de contraintes d'état, comme nous le verrons par la suite, néanmoins toutes ne nécessitent pas le même temps de calcul pour converger vers la solution optimale. Dans ce contexte, la programmation dynamique a été choisie, puisqu'elle permet de résoudre le problème en un temps "raisonnable", tout en conservant une structure d'implémentation qui permet d'utiliser plusieurs types de modèles de véhicules hybrides. Cette méthode est décrite par la suite, et est appliquée pour une étude paramétrique dont le but est d'évaluer la consommation de carburant d'une architecture hybride, en variant certains paramètres de dimensionnement.

Les méthodes indirectes, telles que les méthodes de tir simple ou de tir multiple, revêtent aussi un intérêt non négligeable, car elles permettent de réduire de manière importante le temps de calcul lié à l'optimisation. Dans la suite de ce chapitre, on présente un algorithme original nommé SCOP, basé sur le principe de Pontryagin, qui constitue une alternative aux méthodes de tir multiple, sous certaines hypothèses. Une étude de cet algorithme sur un cas particulier est présentée dans la section 3.4.6, ainsi qu'une application sur un problème de minimisation de la consommation de carburant d'un véhicule hybride sur cycle prédéfini.

