

# Stratégies temps-réel pour véhicules hybrides

## 5.1 Stratégies de commande temps-réel

On trouve dans la littérature beaucoup de lois de gestion d'énergie en ligne, certaines à base de règles, d'autres basées sur la théorie de la commande optimale. Les sous-sections suivantes présentent l'état de l'art des lois de commandes temps-réel pour véhicule hybride.

### 5.1.1 Lois empiriques

Les lois empiriques sont souvent utilisées, car elles ont l'avantage d'être en générale assez simples, et facilement implémentables. On pourra par exemple se référer à [Lin et al., 2003], dont l'étude des résultats d'optimisation permettent d'élaborer facilement une loi à base de règles, ou encore à [Wu et al., 2002], qui utilisent les mêmes techniques.

Ces lois de gestion d'énergie se basent en général sur un découpage du plan (régime / couple) pour le fonctionnement du moteur thermique, afin de déterminer des zones de fonctionnement de chaque source d'énergie. Néanmoins, ces stratégies doivent ensuite être complétées par une pénalisation tenant compte de la mesure de l'état de charge de la batterie, celui-ci devant rester dans la zone d'admissibilité de la batterie.

Ainsi, si cette famille de loi peut être relativement performante si elle est testée sur un cycle identique à celui qui a été utilisé pour la mise en oeuvre de la stratégie, rien n'indique qu'elle le sera sur un cycle inconnu.

### 5.1.2 Réseaux de neurones

Une architecture hybride peut être commandée à l'aide d'un réseau de neurones. Celui-ci reçoit en entrée certaines informations : état de charge de la batterie, régime du moteur thermique, couple de consigne, etc., ses sorties étant les couples des moteurs électrique et thermique.

Le contrôle d'une architecture hybride par réseaux de neurones peut donc être une solution attrayante. Elle permet en effet d'obtenir un contrôle embarqué d'une structure assez légère, puisque le réseau de neurones n'est qu'une suite d'additions et de multiplications. Cela étant, l'utilisation d'un réseau de neurones nécessite que celui-ci ait été entraîné préalablement. Cette étape peut s'avérer assez coûteuse en temps de calcul, puisqu'il devra être entraîné sur un large panel de cycles différents.

D'autre part, l'inconvénient du réseau de neurone est qu'il ne pourra jamais être entraîné sur l'ensemble des conditions de fonctionnement possibles. Ainsi, si des conditions de fonctionnement particulières surviennent, la réponse du réseau de neurones peut ne pas être optimale.

[Scordia, 2004] a développé un contrôleur à base de réseaux de neurones. Si les résultats paraissent relativement bons, l'auteur se place à chaque fois dans des conditions (notamment sur la valeur de l'état de charge au début du cycle) telles que l'état de charge final égale l'état de charge initial. Dans ces conditions, il n'est pas possible de savoir si ce contrôleur parvient à avoir un bilan batterie proche de zéro à la fin du cycle, ni de savoir de combien l'état de charge final s'éloigne de l'état de charge initial.

### 5.1.3 ECMS

L'ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) est une stratégie de commande temps-réel basée sur la théorie de la commande optimale. Présentée dans [Paganelli et al., 2002a], cette stratégie a ensuite été utilisée par de nombreux auteurs sur diverses applications ([Paganelli et al., 2002b]).

Elle consiste à considérer la batterie comme un réservoir de carburant auxiliaire, et à choisir la commande qui minimise l'énergie totale prélevée aux deux réservoirs. C'est donc la variation d'énergie globale qui est comparée pour différentes commandes, à chaque instant.

Pour pouvoir sommer la variation d'énergie électrique à celle du carburant, un coefficient  $p$ , dont l'unité est homogène à des g/J, est associé à la variation d'énergie électrique, ce qui permet de former la quantité suivante à minimiser :

$$L(u(t), t)\Delta t + p(t)\dot{x}(t)\Delta t, \quad (5.1)$$

où  $p$  peut être vu comme un multiplicateur de Lagrange, l'expression (5.1) étant alors l'Hamiltonien  $H$  qui doit être minimisé. La variation de  $L(u(t), t)\Delta t$  dépend directement de l'efficacité du moteur thermique, ce qui explique que cette méthode est une optimisation *locale* car instantanée.

Le coefficient  $p$  agit en fait comme un variateur du "prix" de l'énergie électrique. Plus  $p$  est grand, plus l'énergie électrique coûte cher à utiliser, et plus il sera intéressant d'en récupérer (en faisant de la régénération). Plus  $p$  est faible, et plus l'énergie électrique est peu chère, donc intéressante à utiliser conjointement avec le moteur thermique, ou bien seule.

Il devient donc évident que le coefficient  $p$  est influencé par la quantité d'énergie gratuite, récupérable lors des freinages.

#### Contrôle de $p$ et gestion des contraintes

L'ECMS est une stratégie d'optimisation instantanée, qui tend à choisir à chaque instant la commande minimisant l'Hamiltonien. Dans l'expression (5.1), l'ensemble des grandeurs qui varient en fonction du temps sont déterminées par les mesures instantanées (régime, couple) et / ou via des modèles ou des cartographies. Le coefficient  $p$ , quant à lui, attribue une valeur à l'énergie électrique, donc détermine la façon dont évoluera l'état de charge de la batterie (ou de l'élément capacitif fournissant l'énergie au moteur électrique). C'est donc la variable qui doit être contrôlée. Ainsi, l'avantage de cette stratégie est qu'elle repose sur le contrôle *d'un seul et unique paramètre*,  $p$ , l'ensemble des grandeurs étant ensuite calculées en fonction des mesures et de ce paramètre.

Pour mettre en oeuvre une stratégie comme l'ECMS, deux éléments supplémentaires doivent être déterminés : la valeur initiale de  $p$ , et le type de contrôle sur  $p$ .

#### Contrôle de $p$

Le contrôle du paramètre  $p$  représente en réalité le seul degré de liberté dans l'ECMS. En considérant les conditions d'optimalité en l'absence de contraintes d'état, énoncées dans la section (2.1), on sait que  $p(t)$  doit vérifier

$$\dot{p}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x}(x, u, t, p) \quad (5.2)$$

## 5.2 Comparaison optimisation hors-ligne / lois temps-réel

---

Si  $H$  ne dépend pas de  $x$ , c'est à dire si la dynamique de l'état de charge  $\dot{x}(t)$  ne dépend pas de l'état de charge  $x(t)$ , alors l'état adjoint  $p(t)$  optimal est nécessairement constant  $\forall t \in [0, T]$ . Néanmoins, en l'absence d'informations sur le parcours futur du véhicule, il n'est pas possible de connaître la valeur de  $p$  qui permettra d'atteindre exactement l'état de charge final souhaité au bout d'un temps donné. Il est donc nécessaire de contrôler  $p(t)$  pour s'assurer que l'état de charge reste dans une zone admissible. On peut distinguer plusieurs façons de contrôler  $p(t)$ , la liste suivante n'étant pas exhaustive :

1. On définit une valeur initiale de  $p$ , puis on fait évoluer  $p$  d'une certaine façon lorsqu'on touche une contrainte d'état. Néanmoins, le choix de la valeur initiale peut être déterminant.
2. dans [Sciarretta and Guzzella, 2007], l'auteur définit le multiplicateur  $s(t)$  tel que

$$s(t) = p(t)s_{\text{dis}} + (1 - p(t))s_{\text{chg}}$$

où  $s_{\text{dis}}$  and  $s_{\text{chg}}$  sont deux valeurs limites, et où  $p(t)$  correspond à un facteur de probabilité dépendant de l'énergie totale déjà prélevée à la batterie, de l'énergie mécanique prélevée aux roues, et d'un paramètre lié aux informations données par un système de télémétrie (tel qu'un GPS).

3. dans [Paganelli et al., 2002b], l'auteur définit une fonction de pénalité  $f_{\text{pen}}$  jouant le même rôle que le multiplicateur  $p$ , telle que

$$f_{\text{pen}} = 1 - (1 - 0,8x_{\text{soc}})x_{\text{soc}}^3$$

où  $x_{\text{soc}}$  est une variable dépendante de l'état de charge  $x$  tel que  $x_{\text{soc}} = \frac{x - (x_{\text{min}} - x_{\text{max}})/2}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$ . Cette loi est donc une heuristique, permettant de contrôler la fonction de pénalité lorsque qu'on s'éloigne d'une valeur désirée d'état de charge, ici  $(x_{\text{min}} - x_{\text{max}})/2$ .

4. dans [Ambühl et al., 2007], l'auteur se base sur les résultats de programmation dynamique pour déterminer une valeur du multiplicateur en fonction de l'état de charge. Celui-ci est paramétré selon la loi :

$$p(x, t) = k_p(t)(x_0 - x) + p_0(t) \quad (5.3)$$

où les termes  $k_p(t)$  et  $p_0(t)$  correspondent à une pente et à un offset. L'auteur utilise l'équivalence entre la programmation dynamique et le principe de Pontryagin [Bertsekas, 2001], qui indique que

$$p(t) = \frac{\partial V}{\partial x}(x^*, t) \quad (5.4)$$

où  $V(x^*, t)$  correspond à la fonction valeur définie par l'équation (3.7), et évaluée sur la trajectoire optimale  $x^*(t)$ .

L'auteur évalue la quantité  $\frac{\partial V}{\partial x}(x, t)$  sur une grille temps/espace à l'aide des résultats d'optimisation, puis approche le polynôme (5.3) par des moindres carrés. Si l'approche est intéressante, l'auteur indique néanmoins que le facteur  $p_0(t)$  dans (5.3) est spécifique à chaque cycle.

Le contrôle de  $p(t)$  peut donc être réalisé de différentes manières, sa valeur étant bien-sûr meilleure (car calculable) dès que l'on dispose de connaissances sur le futur parcours du véhicule.

## 5.2 Comparaison optimisation hors-ligne / lois temps-réel

Dans le cadre de l'ECMS, la détermination de la valeur initiale de  $p$  est une vraie difficulté. De plus, une fois la valeur initiale de  $p$  correctement définie, la loi de gestion d'énergie se doit de commander

chacun des moteurs de façon à minimiser la consommation de carburant, tout en veillant à conserver un état de charge qui reste dans une zone admissible.

L'article *Design Optimization and Optimal Control for Hybrid Vehicles* paru au congrès EngOpt 2008, (voir Annexes B), montre une comparaison entre une loi de gestion d'énergie optimale obtenue par la programmation dynamique, et une loi sous-optimale de type ECMS, testée sur un modèle de type AMESim Drive ([Dabadie et al., 2005]), pour un véhicule de caractéristiques légèrement différentes de celles du véhicule traité dans la section 4. Pour cet essai, la valeur initiale du multiplicateur  $p$  employée dans l'ECMS a été déterminée à l'aide des résultats de programmation dynamique, ainsi que par un recalage par essais-erreurs, pour obtenir une valeur plus précise.

Avec la programmation dynamique, on obtient une consommation optimale de 3,81 l/100km sur le cycle NEDC avec le modèle AMESim, ce qui correspond à un gain de 20% par rapport à un véhicule non hybride. L'application de la loi temps-réel ECMS permet d'atteindre une consommation de 3,97 l/100km, soit un gain de 16,6 %. La différence entre ces deux résultats provient de la prise en compte du redémarrage dans l'optimisation hors-ligne, qui est gérée de manière optimale grâce à la connaissance du futur. En revanche, pour une utilisation temps-réel, il n'est pas possible de choisir quel est le moment optimal pour arrêter le moteur thermique, le futur étant inconnu.

### 5.3 Perspectives

Les résultats obtenus dans la section 5.2 sont cohérents avec ce que permet la loi ECMS. La difficulté du choix de  $p_0$ , et du contrôle de  $p$  est réelle, et seules des lois telles que celles présentées dans la section 5.1.3 permettent de moduler  $p$  de façon à conserver un état de charge qui ne dévie pas trop d'une valeur moyenne.

Cependant, lorsque la capacité de la batterie est faible, et lorsque l'état de charge a un réel risque de toucher plusieurs fois les contraintes de bornes, une commande basée sur le fonctionnement de SCOP ( $\mu$  non nul à proximité d'une contrainte) pourrait donner des résultats intéressants.

Par ailleurs, l'ECMS pourrait être très efficace dans le cas où la connaissance – même partielle – du futur serait accessible, par exemple via des informations données par un GPS. Dans un autre cadre, les transports en commun tels que les bus, ayant des trajets connus à l'avance, pourraient permettre de déterminer une valeur de  $p$  en fonction du trajet.

Parmi les perspectives, celle d'utiliser le même type de contrôle pour  $p$ , que ce que nous donne SCOP, à savoir maintenir  $p$  constant lorsqu'on se trouve loin des contraintes, et agir sur  $\mu$  lorsqu'on se trouve près d'une contrainte de borne, serait à envisager, et à tester.

## Chapitre 6

# Application VEHGAN (VEhicule Hybride au GAZ Naturel)

### 6.1 Présentation du véhicule

Le Véhicule VEHGAN (VEhicule Hybride au GAZ Naturel) est un véhicule développé sur la base d'une Smart Fortwo. A vocation urbaine, tout comme la version initiale développée par Smart, ce véhicule a été modifié pour cumuler les avantages de l'hybridation, et ceux apportés par l'utilisation d'un carburant à faible teneur en carbone, le gaz naturel.



FIG. 6.1: *Le véhicule VEHGAN*

Ce prototype a vu le jour à la suite d'un projet Predit soutenu par l'ANR et cofinancé par l'ADEME.

Les partenaires de ce projet sont l'IFP, Gaz de France, VALEO, ainsi que l'INRETS [Tilagone et al., 2005].

L'architecture de ce véhicule est de type micro-hybride, et comprend un moteur thermique équipé d'un alterno-démarrreur, ainsi que des supercapacités qui alimentent celui-ci.

Contrairement au véhicule d'origine qui héberge un moteur essence de 1000 cm<sup>3</sup> de cylindrée, ce véhicule est équipé d'un moteur suralimenté au gaz naturel de 660 cm<sup>3</sup>. La Figure 6.2 représente la consommation spécifique du moteur thermique, en fonction de son point de fonctionnement (régime / couple).

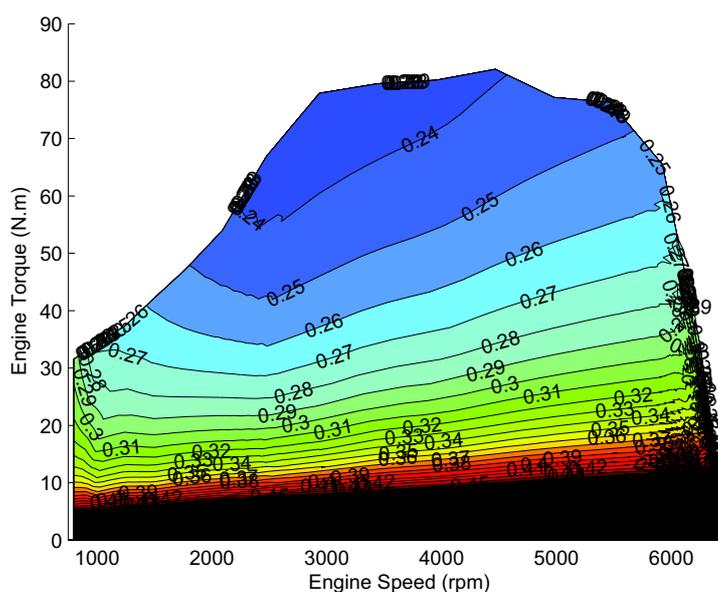


FIG. 6.2: Consommation spécifique du moteur au gaz naturel du véhicule VEHGAN (kg/kWh).

La consommation spécifique étant une image de l'efficacité du moteur thermique, on peut remarquer que celle-ci augmente avec le couple, et ce quel que soit le régime de fonctionnement. Cette particularité est très importante. En effet, elle implique directement qu'une utilisation simultanée du moteur thermique et du moteur électrique (en mode boost) entraînera une dégradation de l'efficacité du moteur thermique au nouveau point de fonctionnement, par rapport à un fonctionnement où le moteur thermique aurait fourni le couple de consigne à lui seul. En conséquence, le seul moyen de faire fonctionner le moteur thermique sur des points de meilleur rendement est d'utiliser le moteur électrique en régénération, pour augmenter le couple fourni par le moteur thermique.

La transmission est réalisée au moyen d'une boîte robotisée à 6 rapports. La présence d'un tel type de boîte de vitesse permet à l'utilisateur de choisir lui-même le rapport qu'il souhaite engager, via une commande au volant, ou bien de laisser le contrôle-moteur décider lui-même du rapport le mieux adapté aux conditions de fonctionnement. Dans ce cas, le rapport choisi sera un compromis entre efficacité du moteur thermique, bruit, potentiel d'accélération, etc. Pour ce type de véhicule, la présence d'une boîte robotisée nous autorise à suivre – ou non – les rapports imposés par le cycle. Dans la suite de ce mémoire, nous choisissons de suivre les rapports imposés par le cycle NEDC, afin de se concentrer sur la gestion d'énergie entre les différents moteurs.

Enfin, l'ensemble de la partie électrique est une solution VALEO pour hybrides légers, nommée

## 6.1 Présentation du véhicule

---

StARS (Starter Alternator Reversible System), voir Figure 6.3. Il s'agit d'un ensemble comprenant un alerno-démarrreur alimenté par des supercapacités.



FIG. 6.3: *Implantation du système StARS sur un moteur thermique*

L'alternateur-démarrreur est un moteur électrique réversible de 3 KW, relié au moteur thermique via une courroie d'accessoires. Le rapport de réduction entre les régimes du moteur thermique  $\omega_e$  et du moteur électrique  $\omega_m$  est  $\omega_m/\omega_e = 1,96$ .

Le contrôleur VALEO, qui commande l'ensemble de la solution StARS, autorise différents modes de fonctionnement :

- Le mode démarreur : comparé à un démarreur classique, l'alternateur-démarrreur du système StARS est capable d'entraîner le moteur thermique à un régime élevé, assurant un démarrage du moteur en moins de 0.4 s. Cette fonctionnalité est nécessaire pour le Stop-and-Start, permettant d'assurer un démarrage rapide et sans vibrations.
- Le mode alternateur : il correspond à la fonction classique d'alternateur sur véhicule, la tension de consigne étant cependant modifiable par l'utilisateur. L'alternateur-démarrreur étant connecté aux supercapacités, dont la plage de fonctionnement se situe entre 16V et 24V, la tension de consigne par défaut sera de 16V.
- Le mode régénération : dans ce mode, l'utilisateur impose une consigne de couple, et non de tension.
- Le mode boost, durant lequel le moteur électrique fournit un couple positif, pour assister le moteur thermique. C'est clairement le but affiché de ce projet : réduire la cylindrée du moteur thermique (downsizing) tout en gardant des prestations similaires, d'une part grâce à un turbocompresseur, et d'autre part grâce à l'apport d'un moteur électrique dans les zones de faibles régimes, pour lesquels le couple maximum du moteur thermique est faible.

Le schéma de la Figure 6.4 représente l'implantation du système électrique au sein du réseau électrique 12V existant.

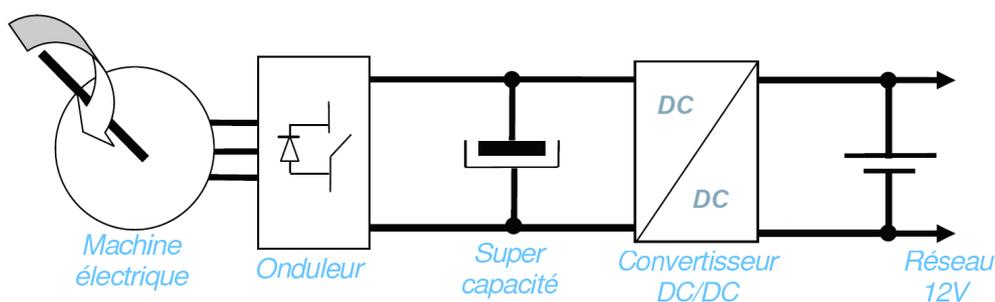


FIG. 6.4: Architecture électrique VEHGAN

Les supercapacités sont les éléments réversibles utilisés ici pour stocker l'énergie nécessaire au moteur électrique. Contrairement aux batteries, les supercapacités possèdent une puissance spécifique supérieure, mais une énergie spécifique plus faible. Elles sont donc surtout utilisées pour de l'assistance courte, ou de la récupération d'énergie, et sont bien adaptées à ce véhicule.

Enfin, un onduleur permet de relier le réseau triphasé du moteur électrique aux supercapacités, tandis qu'un convertisseur DC/DC réalise la liaison entre le réseau 12V du véhicule, et les supercapacités dont la tension varie entre 16V et 24V.

## 6.2 Objectifs

Ce véhicule, de part son architecture micro-hybride, peut faire du Stop-and-Start lors des arrêts temporaires. Lorsque le véhicule est en mouvement, le moteur électrique peut être utilisé pour amener un surplus de couple (mode boost), ou bien pour recharger les supercapacités (mode régénération). Le mode boost (apport d'un surplus de couple) peut donc être activé pour différents besoins :

1. Lors d'une demande importante de couple, que le moteur thermique n'est pas capable de fournir, le moteur électrique assiste donc le moteur thermique. Cette situation peut particulièrement survenir lorsque le régime du moteur thermique est faible, le turbocompresseur étant alors lui-même à un régime trop faible pour être actif.
2. Pour réduire la consommation de carburant, en déchargeant le moteur thermique, une partie du couple demandé par le conducteur étant alors fourni par le moteur électrique.

L'activation du mode boost, dans le cas d'une assistance du moteur électrique pour assurer la consigne de couple, ne participe pas à la minimisation de la consommation de carburant, mais permet d'obtenir un meilleur agrément véhicule à bas régime. Cet aspect ne sera pas traité ici.

En revanche, l'utilisation du moteur électrique pour réduire la consommation de carburant est l'un des objectifs initiaux de ce projet, et est traité dans la suite de ce chapitre. Dans cette optique, le mode boost, mais aussi et surtout le mode régénération, doivent être considérés pour réduire la consommation de carburant. Dans la section 6.3 sont décrites les principales contraintes liées à l'architecture et aux éléments de ce véhicule. Dans le but de développer une loi de commande temps-réel, des modèles représentatifs sont nécessaires, et développés quant à eux dans la section 6.4.

## 6.3 Considérations et contraintes liées à l'architecture

Comme cela a été introduit dans le Chapitre 1.1, chaque architecture possède sa complexité, mais aussi ses avantages et ses défauts, le prix de l'ensemble de la motorisation hybride étant lui-même un

## 6.3 Considérations et contraintes liées à l'architecture

---

élément essentiel. Dans les sections suivantes sont décrites les spécificités liées à l'architecture de la Smart VEHGAN, ainsi qu'aux éléments en eux-mêmes.

### 6.3.1 Freinage récupératif

L'architecture est un micro-hybride, le moteur électrique est donc mécaniquement lié au moteur thermique (pas de désaccouplement possible des deux moteurs). Le moteur électrique étant situé en amont de la transmission, le freinage récupératif ne peut s'effectuer que lorsqu'un rapport est engagé.

La présence du mode régénération permet de profiter du freinage récupératif, donc de récupérer une partie de l'énergie cinétique, qui est normalement dissipée par effet Joule (frottement des plaquettes de frein sur les disques) sur les véhicules conventionnels. En pratique, l'énergie récupérée durant un freinage récupératif reste faible sur ce véhicule, pour plusieurs raisons :

1. Le véhicule est relativement léger : il ne pèse que 820 kg, supercapacités comprises. L'énergie cinétique étant directement dépendante du poids, l'énergie récupérable reste faible.
2. Le système de freinage est assuré par le système ABS d'origine. N'ayant pas la main sur le contrôleur du système de frein, il n'est pas possible de réguler le couple du moteur électrique en modifiant celui du système de frein. D'autre part, à l'heure actuelle, seule une mesure de type binaire nous informe s'il y a un freinage ou non, la mesure de l'enfoncement de la pédale de frein n'étant pas disponible, comme c'est le cas dans le contrôle moteur d'aujourd'hui.
3. Comme indiqué dans la section 1.1.1, la répartition de freinage entre le train avant et le train arrière ne permet de récupérer qu'une partie de l'énergie cinétique du véhicule, la répartition de freinage habituellement choisie étant de 70% sur l'avant et 30% sur l'arrière. Cette répartition est nécessaire à cause du transfert de masse lors d'une décélération, afin d'assurer une stabilité du véhicule durant un freinage.
4. L'architecture étant un micro-hybride, le moteur électrique reste mécaniquement lié au moteur thermique (pas de désaccouplement possible des deux moteurs). De plus, comme le moteur électrique est situé en amont de la transmission, le freinage récupératif ne peut être actif que lorsqu'un rapport de boîte est engagé. Aussi, la récupération au freinage est amputée du couple de frottement du moteur thermique (appelé frein moteur). Ce couple de frottement correspond aux pertes par pompage du moteur thermique, ajoutées aux pertes par frottement du moteur thermique et de la transmission.

L'ensemble de ces considérations limite l'énergie récupérable au freinage, celle-ci restant assez faible sur ce véhicule. De plus, les accélérations et freinages du cycle NEDC ne sont pas très importantes, ce qui ne permet donc pas de récupérer beaucoup d'énergie lors des freinages.

### 6.3.2 Couple positif du moteur électrique

Sur cette machine, le mode boost ne dispose que de cinq niveaux de couple positif, le moteur électrique ne pouvant fournir un couple continu. Ces cinq niveaux sont obtenus en modifiant la position du capteur de position du rotor et le courant d'excitation. La Figure 6.5 indique les couples mesurés sur banc moteur, pour différents régimes, à la tension  $U_s = 24V$ .

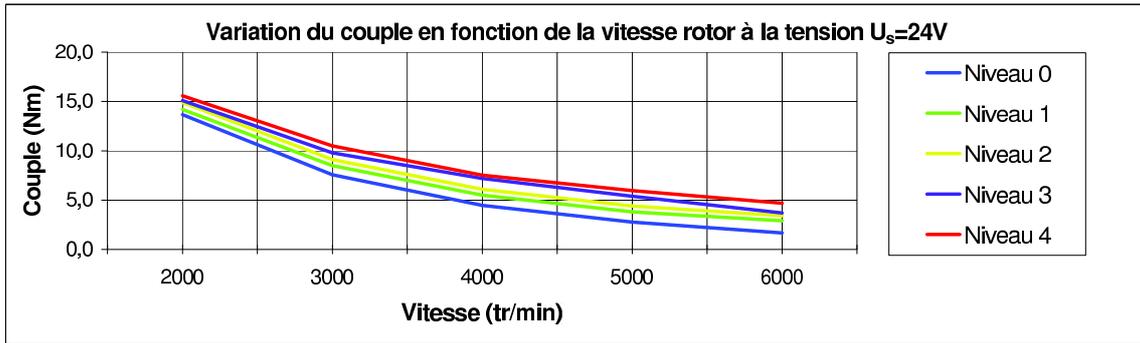


FIG. 6.5: Valeur du couple maximal pour les cinq niveaux de couple disponibles à  $U_s = 24V$ , en fonction du régime  $\omega_m$  (mesures issues d'essais sur banc moteur Valeo).

Ces cinq niveaux dépendent des conditions de fonctionnement : tension  $U_s(t)$ , régime de rotation  $\omega_m(t)$ , température interne de fonctionnement, etc. et ne fournissent donc pas un couple constant. La Figure 6.6 illustre la variation du couple, pour le niveau 4, en fonction du régime et de la tension  $U_s$ .

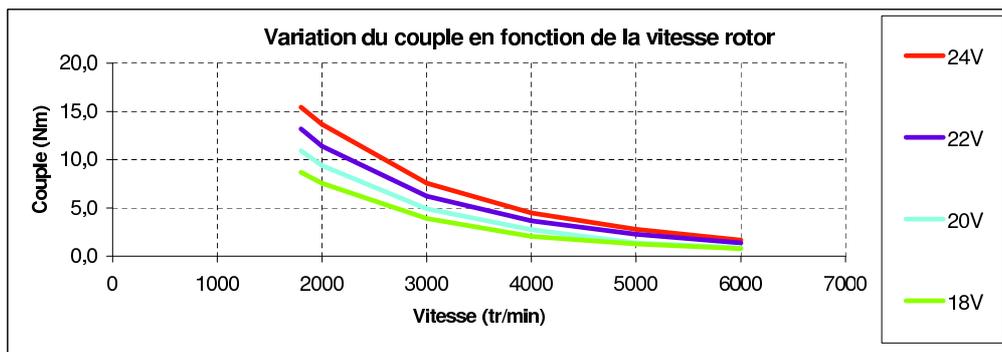


FIG. 6.6: Valeur du couple maximal pour un niveau de couple donné en fonction du régime  $\omega_m$ , pour différentes tensions  $U_s$  (mesures issues d'essais sur banc moteur Valeo).

Cette contrainte pèse très lourd dans l'utilisation du moteur électrique. En effet, les valeurs de couples à disposition ne sont qu'au nombre de cinq, et sont très proches les unes des autres. Ces valeurs ne permettent donc pas de tester plusieurs couples admissibles assez différents, qui seraient susceptibles de déplacer le point de fonctionnement du moteur thermique, et d'en optimiser l'efficacité.

D'après les spécifications fournies par Valeo, la différence entre les couples minimal et maximal, pour un point de fonctionnement donné, n'excède pas 2 Nm. D'après la Figure 6.5, cette différence varie entre 2 et 3 Nm selon le régime.

### 6.3.3 Couple négatif du moteur électrique

Le mode régénération, lorsque l'on impose un couple négatif au moteur électrique, peut être activé dans deux cas : lors d'un freinage récupératif, ou bien lors d'une régénération par le moteur thermique.

Dans ce mode, le moteur électrique est seulement limité par son couple minimum, toutes les valeurs intermédiaires entre cette limite et le couple nul restant réalisable. En conséquence, on pourra choisir librement le couple lors d'une régénération par le moteur thermique. De plus, contrairement au mode boost, on communique directement au contrôleur Valeo, via un protocole CAN, quel est le couple souhaité. Si la température du rotor (non mesurée actuellement) a une influence sur le couple du moteur

## 6.4 Modèles développés pour la source de puissance électrique

---

électrique, le couple varie néanmoins faiblement avec l'évolution de la tension.

En ce qui concerne le freinage récupératif, celui-ci nécessite de connaître la consigne de freinage donnée par l'enfoncement de la pédale de frein, mais aussi de dialoguer avec le système de freinage qui utilise la fonction ABS (Antilock Brake System), cette fonction assurant au véhicule un freinage sans blocage des roues.

En l'absence d'une mesure disponible indiquant l'enfoncement de la pédale, nous commandons le moteur électrique avec un couple de  $-4$  Nm (couple au rotor, à multiplier par 1,96 pour avoir son action au niveau du moteur thermique) lors d'un freinage, ceci afin d'assurer d'avoir un comportement peu modifié. D'autre part, on applique ce même couple en mode cut-off, ce mode correspondant à un relâchement de la pédale d'accélérateur (donc arrêt de l'injection de carburant), entraînant le frein moteur.

### 6.3.4 Tension de fonctionnement des supercapacités

Les supercapacités de la VEHGAN sont prévues pour fonctionner entre  $U_s = 16$  V et  $U_s = 24$  V. On pourra cependant autoriser la borne inférieure à être légèrement franchie, notamment dans le cas où un arrêt du moteur thermique à  $U_s = 16$  V provoque forcément un redémarrage, durant lequel la tension  $U_s$  chute à une valeur proche de 15 V.

La borne supérieure, quant à elle, ne doit pas être franchie (présence d'une sécurité dans le contrôleur Valeo).

## 6.4 Modèles développés pour la source de puissance électrique

L'optimisation de la répartition de couple pour minimiser la consommation requiert de disposer de modèles représentatifs de la partie électrique fournissant le couple. En effet, la spécificité du véhicule, en particulier du système de stockage d'énergie électrique, ne permet pas d'utiliser des modèles tels que ceux qui ont été développés dans la section 4.2. Le moteur électrique n'est pas alimenté par une batterie, mais par des supercapacités, dont la tension  $U_s$  ne peut être considérée comme constante durant un essai.

Les modèles développés sont amenés à être utilisés d'une part conjointement avec un algorithme de programmation dynamique, puis en temps-réel via une stratégie de contrôle sur véhicule. Dans cette optique, il n'est pas nécessaire de posséder un modèle global qui soit complexe, notamment afin d'avoir un temps d'optimisation qui reste raisonnable.

De plus, il est surtout important, dans cette application, de posséder des modèles qui reproduisent parfaitement le comportement du système en stabilisé, et dont le comportement transitoire est correctement reproduit. En effet, la connaissance du comportement transitoire des éléments du système est surtout intéressante pour l'élaboration des consignes de couple des moteurs thermiques et électriques, mais elle est peu utile pour la minimisation de la consommation de carburant, celle-ci étant davantage une image des fonctionnements en stabilisé.

Enfin, le moteur électrique de la solution StARS de Valeo est un alterno-démarrreur, qui représente un produit phare de leur gamme. En conséquence, peu d'informations nous ont été fournies par l'équipementier, que ce soit au niveau du contrôle du couple réalisé par le contrôleur Valeo, de la configuration interne au moteur, ou bien de courbes issues d'essais dynamiques.

Pour ces raisons, les modèles présentés dans la suite de ce mémoire ne sont pas particulièrement fins, mais s'exécutent en un temps de calcul assez faible, et reproduisent suffisamment bien le comportement des éléments de la source de couple électrique par rapport aux besoins.

### 6.4.1 Moteur électrique

Le moteur électrique du système StARS est une machine synchrone réversible autopilotée comportant 6 aimants permanents.

Un modèle réaliste, comme il a été décrit par [Sciarretta et al., 2004], donne l'évolution du couple pour ce type de moteur

$$T_m(t) = \frac{3}{2} p \Phi_m \frac{R_{st} U_q(t) - p \omega_m(t) R_{st} \Phi_m - p \omega_m(t) L_{st} U_d(t)}{R_{st}^2 + p^2 \omega_m^2(t) L_{st}^2}, \quad (6.1)$$

où  $\omega_m(t)$  est la vitesse du rotor,  $R_{st}$  est la résistance du stator,  $\Phi_m(t)$  est le flux,  $U_q(t)$  et  $U_d(t)$  sont les tensions d-q du stator,  $L_{st}$  est l'inductance du stator, et  $p$  est le nombre de paires de pôles. Pour des raisons de simplification, nous choisissons de modéliser ce moteur en utilisant les équations décrivant le comportement d'un moteur à courant continu (DC), cela en négligeant la contribution des termes non-linéaires. Nous remplaçons donc (6.1) par

$$T_m(t) = \frac{1}{R_a} (K_m(t) U_a(t) - K_a(t) K_m(t) \omega_m(t)), \quad (6.2)$$

où  $\omega_m(t)$  est la vitesse du moteur,  $U_a(t)$  joue le rôle de la tension DC de l'armature,

$$U_a(t) = K_a(t) \omega_m(t) + R_a I_a(t), \quad (6.3)$$

$I_a(t)$  joue le rôle du courant d'armature,  $R_a$  celui de la résistance d'armature. Comme nous le verrons par la suite, les quantités  $K_a(t)$  et  $K_m(t)$  ne sont pas constantes comme elles le sont pour un moteur DC, étant donné qu'elles représentent l'influence des tensions et courants variables du repère d-q, modulées par l'unité de contrôle du moteur. Les équivalences entre les grandeurs réelles du modèle AC, et les grandeurs fictives du modèle DC, ici  $U_a(t)$ ,  $I_a(t)$ ,  $K_a(t)$ ,  $K_m(t)$ , et  $R_a(t)$  peuvent être retrouvées en comparant (6.1) et (6.2–6.3).

### 6.4.2 Supercapacité

Le moteur électrique est alimenté en énergie par une supercapacité. Les supercapacités, appelées aussi supercondensateurs, constituent une nouvelle technologie de stockage, apparue dans les années 90. Comparées aux batteries, leur énergie spécifique est plus faible, ce qui ne leur permet pas d'avoir une grande autonomie. En revanche, leur puissance spécifique est supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques (batteries), ce qui rend ces éléments assez bien adaptés à un rôle d'assistance ou de récupération aux freinages pour les véhicules hybrides. Dans [Thounthong, 2005], l'auteur présente plus en détail cet élément, et indique les modèles plus ou moins représentatifs, selon la complexité et le réalisme désiré. Devant l'usage requis, nous choisissons un modèle relativement simple pour la représentation de cet élément.

Un circuit équivalent simple de supercapacité peut être construit à partir de capacités en série avec une résistance [Guzzella and Sciarretta, 2005], [Thounthong, 2005]. La loi de Kirchhoff's mène à :

$$U_s(t) = \frac{Q(t)}{C} - R_s I_s(t), \quad I_s(t) = -\frac{dQ(t)}{dt}, \quad (6.4)$$

où  $U_s(t)$  est la tension aux bornes,  $I_s(t)$  est le courant délivré,  $R_s$  est la résistance équivalente,  $C$  est la capacité, et  $Q(t)$  représente la charge.

### 6.4.3 Lien DC/AC

La connexion électrique entre le moteur électrique et la supercapacité est réalisée grâce à un onduleur. Nous considérons ici que l'onduleur n'a aucune perte, i.e.  $P_s(t) = P_a(t)$  avec  $P_s(t)$  la puissance fournie (respectivement absorbée, dans le cas d'une régénération) par la supercapacité, et  $P_a(t)$  la puissance absorbée (respectivement fournie) par le moteur électrique. Nous supposons ici que le niveau de couple positif du moteur électrique est contrôlé via le rapport de tension  $\lambda(t)$  de l'onduleur tel que

$$U_s(t) = \frac{1}{\lambda(t)} U_a(t), \quad I_s(t) = \lambda(t) I_a(t). \quad (6.5)$$

À cause de la présence de contraintes physiques internes au moteur, il n'est pas possible de contrôler le moteur électrique de manière continue en agissant sur la variable de contrôle  $\lambda(t)$  pour un couple de consigne positif (voir section 6.3.2). En pratique, suivant les spécifications fournies par Valeo, le contrôleur dispose de seulement cinq niveaux de couples. Nous considérons donc que ces cinq niveaux de couple correspondent à cinq valeurs discrètes de  $\lambda$  à chaque instant  $t$ , dépendantes des conditions de fonctionnement du système ( $\omega_m(t)$  et  $U_s(t)$ )

$$\lambda \in (\lambda_i)_{i \in \llbracket 0,4 \rrbracket}. \quad (6.6)$$

On rappelle que la différence entre les couples minimal et maximal (obtenus avec  $\lambda \in (\lambda_i)_{i \in \llbracket 0,4 \rrbracket}$  pour un point de fonctionnement donné) n'excède pas 2 Nm.

### 6.4.4 Modèle dynamique du système électrique

La relation de causalité du système complet est schématisée sur la Figure 6.7. Les deux variables d'entrée sont d'une part le régime du moteur  $\omega_m(t)$ , imposé par le cycle de conduite, et d'autre part le contrôle  $\lambda(t)$ . La variable de sortie est le couple  $T_m(t)$  fourni par le moteur électrique.

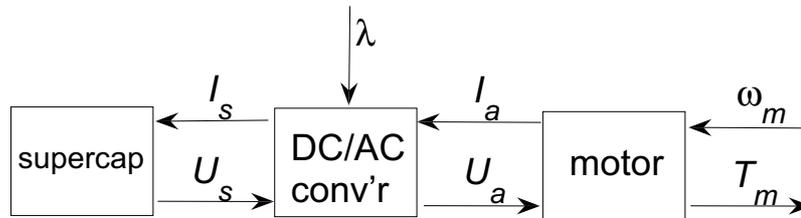


FIG. 6.7: Représentation dynamique du système électrique

Pour obtenir l'équation dynamique entre le couple et la vitesse, nous dérivons chaque terme de la première équation de (6.4), ce qui mène à

$$\dot{\mathcal{U}}_s(t) = -\frac{I_s(t)}{C} - R_s \dot{I}_s(t). \quad (6.7)$$

A partir de (6.3) et (6.5) nous obtenons

$$I_s(t) = \lambda(t) \frac{\lambda(t) U_s(t) - K_a(t) \omega_m(t)}{R_a}. \quad (6.8)$$

En remplaçant, dans (6.7),  $I_s(t)$  et  $\mathring{K}_s(t)$  par leur expression issue de (6.8), on obtient finalement

$$\mathring{U}_s(t) = \frac{1}{1 + \lambda^2(t) \frac{R_s}{R_a}} \left[ -U_s \left( \frac{\lambda^2(t)}{CR_a} + \frac{2R_s}{Ra} \lambda(t) \mathring{K}(t) \right) + \frac{\lambda(t) K_a(t) \omega_m(t)}{CR_a} + \frac{R_s}{R_a} \left( \mathring{K}(t) K_a(t) \omega_m(t) + \lambda(t) \mathring{K}_a(t) \omega_m(t) + \lambda(t) K_a(t) \mathring{\mathfrak{d}}_m(t) \right) \right]. \quad (6.9)$$

Avec la paramétrisation de  $K_a(t)$  décrite dans la section 6.5 suivante, à savoir  $K_a(t) = \frac{K_{a0}}{\omega_m(t)}$ , on peut simplifier l'expression 6.9 en supprimant les termes en  $\mathring{\mathfrak{d}}_m$  et en  $\mathring{K}_a(t)$  :

$$\mathring{U}_s(t) = \frac{1}{1 + \lambda^2(t) \frac{R_s}{R_a}} \left[ -U_s \left( \frac{\lambda^2(t)}{CR_a} + \frac{2R_s}{Ra} \lambda(t) \mathring{K}(t) \right) + \frac{\lambda(t) K_a(t) \omega_m(t)}{CR_a} + \frac{R_s}{R_a} \left( \mathring{K}(t) K_a(t) \omega_m(t) \right) \right]. \quad (6.10)$$

Cette équation dynamique est ensuite utilisée pour le calage des paramètres.

## 6.5 Calage des paramètres du modèle et validation

Les mesures et grandeurs représentatives du système sont la tension des supercapacités  $U_s$ , le courant  $I_s$  qui en est débité, et le couple  $T_m$  développé par le moteur électrique. Ce sont donc ces grandeurs qui sont simulées grâce au modèle, puis recalées en les comparant aux données réelles. Les paramètres dont on recherche la valeur sont les résistances  $R_a$  et  $R_s$ , la capacité  $C$ , et les gains  $K_a$  et  $K_m$ .

Le modèle global de la source de puissance électrique n'a été recalé et testé que lorsque le couple du moteur électrique est positif, à partir de quelques essais dynamiques effectués sur bancs par Valeo. En revanche, nous n'avons obtenu que très tardivement des courbes provenant d'essais dynamiques pour des couples négatifs, donc la réponse dynamique de ce modèle n'a pas été recalée pour des couples négatifs. Des cartographies (fournies par Valeo) sont utilisées en lieu et place du modèle du moteur électrique et de l'onduleur, le modèle de la supercapacité restant quant à lui encore utilisé.

Les essais réalisés sur banc correspondent à des commandes du moteur électrique pour le premier niveau de couple, aucune donnée ou mesure ne nous ayant été transmise en ce qui concerne la façon dont évolue la tension à des niveaux de couples inférieurs.

Afin de calibrer les paramètres du modèle sur les courbes des essais expérimentaux, on effectue un transitoire de régime sur  $\omega_m(t)$ . L'expression de  $\mathring{U}_s(t)$  dépendant d'un terme proportionnel à  $\mathring{\mathfrak{d}}_m(t)$ , on peut s'attendre à une baisse instantanée de quelques volts de la tension  $U_s(t)$ , suivie d'une baisse plus lente imposée par le terme proportionnel à  $\lambda(t)^2 U_s(t)$ .

Les Figures 6.8 et 6.9 représentent les réponses du modèle comparées aux mesures sur bancs fournies par Valeo. Sont représentés ici la tension des supercapacités  $U_s$  et le courant du moteur électrique  $I_s$  pour différents régimes  $\omega_m$ .

## 6.5 Calage des paramètres du modèle et validation

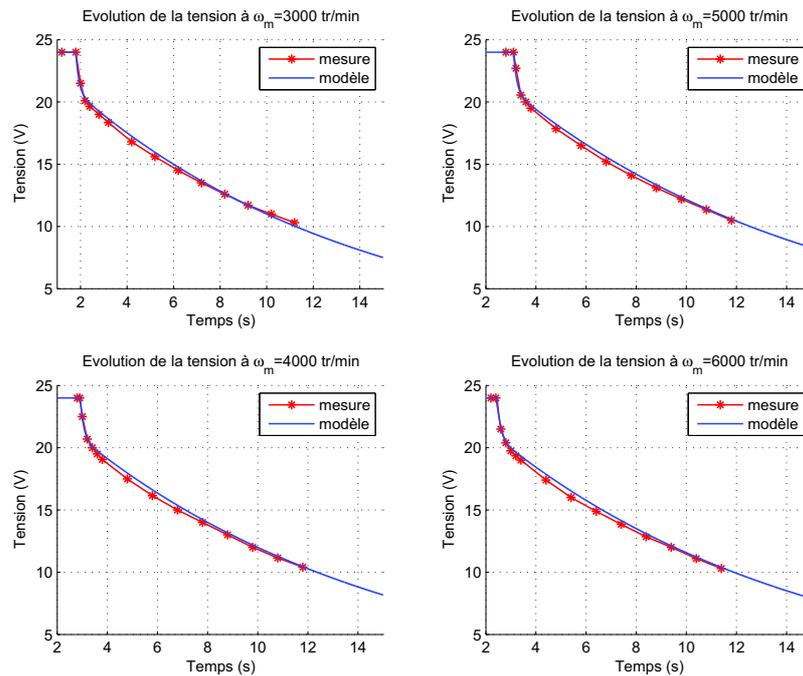


FIG. 6.8: Evolution de la tension  $U_s$  de la supercapacité pour un boost avec le niveau 4, pour différents régimes.

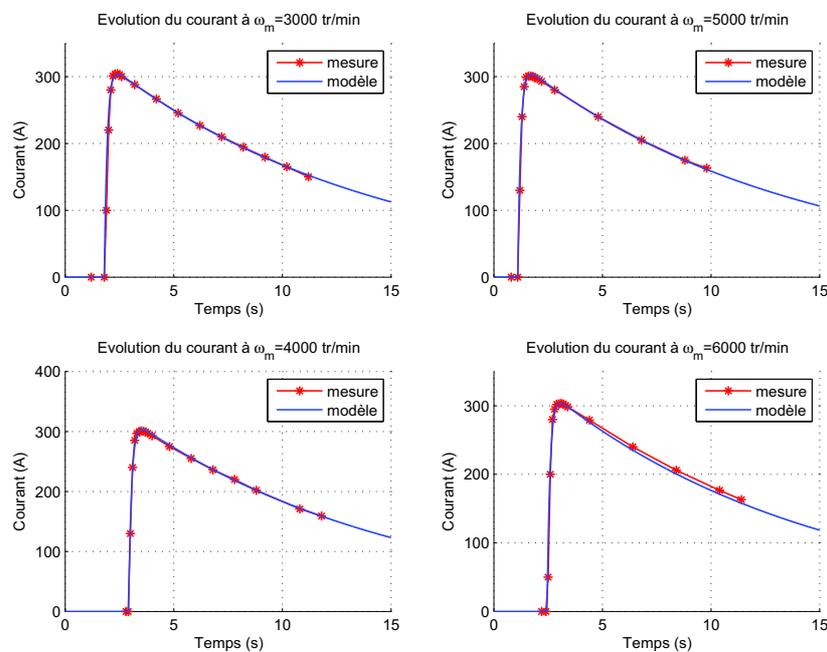


FIG. 6.9: Evolution du courant  $I_s$  de la supercapacité pour un boost avec le niveau 4, pour différents régimes.

Les données expérimentales ont été post-traitées par Valeo avec un filtre passe-bas de constante de temps proche de 100 ms, filtre qui est en conséquence aussi appliqué sur les réponses du modèle. Dans la pratique, la chute de tension observée sur la Figure 6.8 est quasi-instantanée. Quatre régimes moteur sont appliqués, de 3000 tr/min à 6000 tr/min, permettant de juger du réalisme du modèle avec des conditions de fonctionnement différentes.

La tension initiale aux bornes de la supercapacité est  $U_{s0} = 24$  V pour l'ensemble des essais. Lors du transitoire de régime sur  $\omega_m(t)$ , la tension aux bornes de la supercapacité subit une chute rapide d'environ 4 V, suivie par une décroissance plus douce. En conséquence, le courant de la supercapacité  $I_s(t)$  (Figure 6.9) subit une augmentation rapide mais peu brutale due au filtre ; elle est ensuite suivie par une diminution lente, qui devrait théoriquement faire tendre le courant  $I_s(t)$  vers 0 quand la supercapacité est complètement déchargée.

La comparaison entre données expérimentales et simulations des Figures 6.8 et 6.9 montre que l'approche développée est capable de reproduire le comportement global du système, et ses principales dynamiques. Les paramètres ayant été recalés par une étape d'optimisation, nous avons pu établir que les paramètres  $K_a$  et  $K_m$  n'étaient pas constants, et variaient selon la paramétrisation suivante :

$$K_a(t) = \frac{K_{a0}}{\omega_m(t)}, \quad K_m(t) = K_{m0} \frac{U_s(t)}{\omega_m(t)}. \quad (6.11)$$

Les valeurs recalées du modèle sont listées dans la Table 6.1.

TAB. 6.1: Valeurs numériques des paramètres du modèle, après optimisation.

Parameter	Value
C	196 C
$R_a$	30.7 $\Omega$
$R_s$	6 m $\Omega$
$K_{a0}$	8
$K_{m0}$	125

## 6.6 Optimisation hors-ligne : programmation dynamique

On s'intéresse ici à la minimisation de la consommation sur cycle normalisé, durant lequel le moteur thermique reste allumé. Il s'agit donc d'un problème du même type que le problème (1.1), qui sera défini dans la section suivante.

Pour déterminer quel est le potentiel du véhicule en terme de réduction de la consommation de carburant, nous appliquons un algorithme d'optimisation (déjà présenté dans la section 3.3.2), la programmation dynamique.

### 6.6.1 Variable d'état et définition du problème d'optimisation

Lorsque l'on recherche la loi de commande optimale d'un véhicule hybride, la programmation dynamique est habituellement appliquée au système dynamique représentant la batterie, dont l'état de charge correspond alors à l'état (discrétisé) utilisé. Ce choix, s'il est légitime, nécessite aussi de devoir estimer l'état de charge de la batterie, information sujette notamment aux incertitudes du modèle quant à la température de la batterie.

## 6.6 Optimisation hors-ligne : programmation dynamique

---

Dans l'application traitée, la Smart n'est pas équipée d'une batterie pour l'alimentation du moteur électrique, mais de supercapacités. Contrairement à la batterie, aux bornes de laquelle la tension évolue peu et peut être considérée – au premier ordre – comme constante, la tension aux bornes de supercapacités est très variable. De plus, la tension aux bornes de supercapacités est une image de l'énergie présente dans celle-ci, lorsque la tension est mesurée à vide. Aussi, plutôt que de considérer l'état de charge comme variable d'évolution, on choisit de considérer une tension.

On rappelle que la tension aux bornes des supercapacités s'écrit

$$U_s(t) = \frac{Q(t)}{C} - R_s I_s(t), \quad (6.12)$$

d'après le modèle de circuit RC choisi. Comme la tension  $U_s$  dépend directement du courant, donc des chutes ohmiques dues à la résistance  $R_s$ , il est plus logique de choisir la tension  $U_c$  telle que

$$U_c(t) = \frac{Q(t)}{C}, \quad (6.13)$$

comme variable d'état,  $U_c(t)$  évoluant bien en fonction de l'énergie présente dans les supercapacités. On a alors directement

$$\dot{U}_c(t) = -I_s(t). \quad (6.14)$$

### Dynamique de $U_c(t)$ pour un couple positif (mode boost)

Dans le cas où le moteur électrique fournit un couple positif,  $I_s(t)$  est défini par l'équation (6.8). Avec  $U_s(t) = U_c(t) - R_s I_s(t)$ , l'équation (6.8) s'écrit

$$I_s(t) = \lambda(t) \frac{\lambda(t)(U_c(t) - R_s I_s(t)) - K_a(t)\omega_m(t)}{R_a}. \quad (6.15)$$

En isolant  $I_s(t)$ , et en remplaçant  $K_a(t)$  par  $K_{a0}/\omega(t)$ , on trouve

$$I_s(t) = \frac{\lambda^2(t)U_c(t) - \lambda(t)K_{a0}}{R_a + \lambda^2(t)R_s}. \quad (6.16)$$

On obtient ainsi, dans le cas où le courant  $I_s(t)$  est positif,

$$\dot{U}_c(t) = -\frac{1}{C} \frac{\lambda^2(t)U_c(t) - \lambda(t)K_{a0}}{R_a + \lambda^2(t)R_s}. \quad (6.17)$$

Dans la suite, on notera que la tension  $U_c$  varie selon la loi

$$\dot{U}_c(t) = f_1(U_c(t), \lambda(t), t) \quad (6.18)$$

lorsque le courant  $I_s$  est positif, i.e. en mode boost.

### Dynamique de $U_c(t)$ pour un couple négatif (mode régénération)

Dans le cas où le courant  $I_s(t)$  est négatif, celui-ci est une fonction de la tension  $U_s$  (donc de  $U_c$ ), du régime  $\omega_m$ , et du couple demandé  $T_m$  qui constitue le contrôle, le courant  $I_s(t)$  étant alors donné par des cartographies de fonctionnement statique. On considère que  $I_s(t)$  s'écrit

$$I_s(t) = \text{Map}(U_c(t), \omega_m(t), T_m(t)), \quad (6.19)$$

où  $Map(\cdot)$  désigne les cartographies utilisées, ce qui mène à l'expression suivante de  $\mathcal{U}_c(t)$  dans le cas où le courant  $I_s$  est négatif (mode régénération).

$$\mathcal{U}_c(t) = -\frac{1}{C}Map(U_c(t), \omega_m(t), T_m(t)). \quad (6.20)$$

On considère que  $\mathcal{U}_c(t)$  varie donc selon la loi

$$\mathcal{U}_c(t) = f_2(U_c(t), T_m(t), t), \quad (6.21)$$

lorsque le courant  $I_s$  est négatif, i.e. en mode régénération.

### Problème d'optimisation

Le problème d'optimisation à résoudre s'écrit finalement

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{u \in U} \left\{ J(u) := \int_0^T L(t, \lambda(t), T_m(t)) dt + \phi(U_c(T), T) \right\} \\ \text{avec :} \\ \mathcal{U}_c = \begin{cases} f_1(U_c(t), \lambda(t), t) & \text{si } T_m(t) > 0 \\ f_2(U_c(t), T_m(t), t) & \text{si } T_m(t) < 0 \end{cases}, \quad U(0) = U_0 \\ T_m^{\min}(t) \leq T_m(t) \leq T_m^{\max}(t) \\ U_c^{\min} \leq U_c(t) \leq U_c^{\max}, \end{array} \right. \quad (6.22)$$

où le moteur électrique est soit commandé avec  $\lambda(t)$  pour un couple positif, soit avec  $T_m(t)$  pour un couple négatif.

### 6.6.2 Prise en compte des contraintes

Les contraintes de couple minimal et maximal dépendent de la tension  $U_s$  aux bornes des supercapacités, et non de la tension  $U_c$ . On a les contraintes suivantes :

- Le couple délivré  $T_m$  dépend de la tension  $U_s$ . Les valeurs de couple maximal (lors d'un mode boost) ou de couple minimal (lors d'un mode régénération) doivent donc être prises en compte à partir de la tension  $U_s$ , et non de la tension  $U_c$ . La chute de tension aux bornes des supercapacités, lors de l'établissement du courant, pouvant atteindre 3 V, celle-ci doit être prise en compte pour connaître le couple réellement délivré.
- La contrainte sur la tension maximale est une contrainte sur la tension  $U_s$ . Elle provient d'une sécurité du système Valeo.
- La contrainte sur la tension minimale (voir section 6.3.4) pourra être définie par rapport à  $U_c$ , pour laisser davantage de marge au système.

### 6.6.3 Hypothèses

Dans le problème de minimisation de la consommation, le faible potentiel de cette architecture nous amène à aussi considérer la puissance électrique prélevée par les consommateurs de courant, comme c'est le cas sur véhicule. Celle-ci est composée d'une part des consommateurs réguliers (boîtiers de contrôle-commande, carte de puissance pour l'alimentation électrique des principaux actionneurs, etc.), ainsi que des consommateurs ponctuels (phares, clignotants, feux de stop, autoradio, etc.). La présence d'un convertisseur DC/DC entre la batterie et la supercapacité nous permet de supposer que la puissance électrique est prélevée de la supercapacité vers la batterie, celle-ci alimentant ensuite les consommateurs

## 6.6 Optimisation hors-ligne : programmation dynamique

---

de courant. À partir de quelques mesures sur véhicule, nous considérons que 140 W sont prélevés de manière continue par les auxiliaires.

D'autre part, les modèles AMESim disponibles au moment de ces travaux ne pouvant fonctionner avec le mode Stop-and-Start, l'ensemble des résultats obtenus en simulation correspondent à des essais où le Stop-and-Start n'est à aucun moment activé.

### 6.6.4 Définition des contrôles

Pour la commande du moteur électrique, onze valeurs distinctes sont testées :

- cinq couples positifs, qui correspondent aux cinq niveaux définis par  $\lambda \in (\lambda_i)_{i \in \llbracket 0,4 \rrbracket}$ , et donc aux cinq couples admissibles par le moteur électrique,
- cinq couples négatifs, arbitrairement choisis, pour le mode régénération,
- une valeur nulle correspondant au moteur électrique non utilisé, i.e.  $T_m = 0$ .

### 6.6.5 Résultats de l'optimisation hors-ligne

L'optimisation hors ligne est utilisée alternativement à partir de consignes provenant de deux modèles : l'un étant un modèle *backward* sous Simulink, et l'autre étant un modèle *forward* sous AMESim. Dans les deux cas, on utilisera le modèle sous Simulink pour établir la loi de commande optimale sur le cycle, avec la programmation dynamique. La loi optimale obtenue est ensuite testée en boucle ouverte sur le modèle dont sont issues les consignes utilisées lors de l'optimisation.

1. Simulation de la loi optimale sur le modèle sous Simulink : on utilise ici un modèle sous Simulink, dans lequel la source de puissance électrique est modélisée par les modèles présentés en section 6.4.4, et la consommation de carburant est représentée par une cartographie, donc par un modèle statique. La loi de commande optimale est ensuite simulée sur ces mêmes modèles. La démarche complète est détaillée par la suite.
2. Simulation de la loi optimale sur le modèle sous AMESim : L'optimisation est réalisée à l'aide du modèle sous Simulink, les consignes (régime, couple, etc.) étant issues du modèle AMESim. La loi de commande optimale est ensuite testée sur le modèle AMESim. La démarche suivie est détaillée par la suite.

### Résultats sur modèle sous Simulink

Dans un premier temps, on calcule la trajectoire  $(\omega_e, T_{rq})$  suivie par le véhicule en utilisant des modèles du même type que ceux de la section 4.2. Les modèles utilisés étant des modèles backward, le régime du moteur thermique  $\omega_e$  est donc calculé pour suivre exactement la trajectoire. Les temps de passage de vitesse sont négligés. Le couple  $T_{rq}$  calculé pour suivre exactement le cycle de conduite doit donc être réparti de manière optimale pour minimiser la consommation de carburant. La solution optimale obtenue est ensuite simulée sur ces mêmes modèles, sous Simulink.

La Figure 6.10 regroupe les résultats obtenus. A gauche sont représentées certaines grandeurs significatives sur l'ensemble du cycle NEDC, tandis qu'à droite, un zoom sur les 200 premières secondes permet de mieux observer les variations.

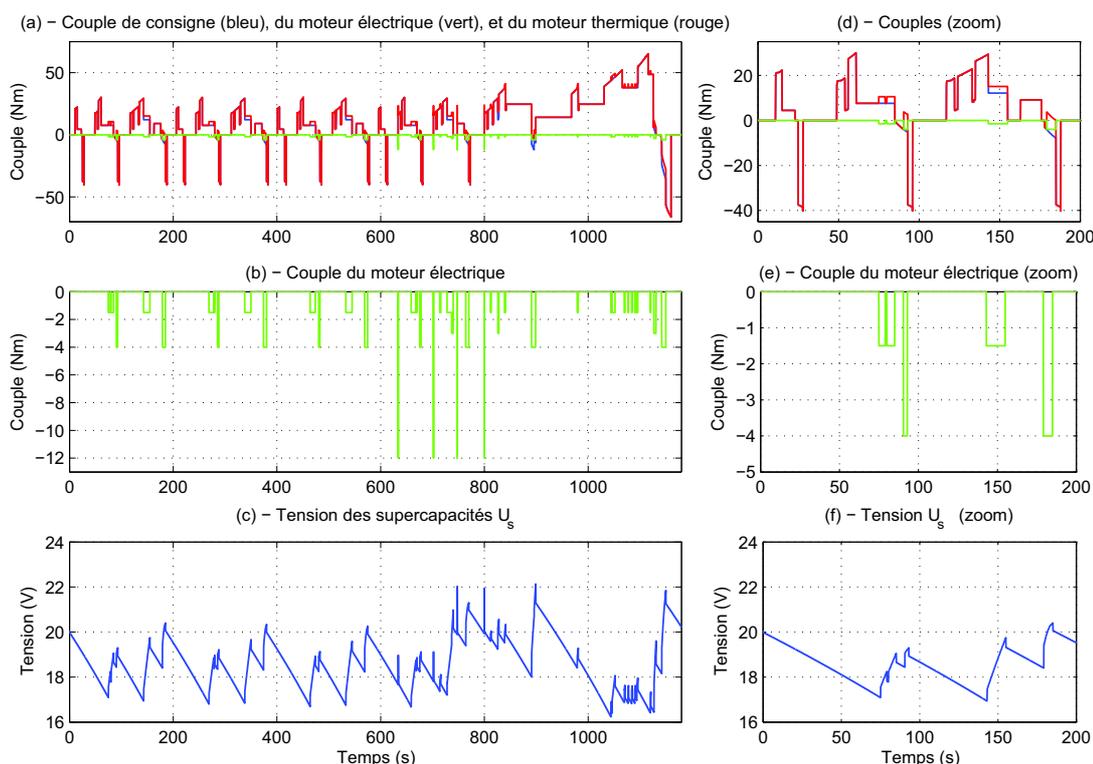


FIG. 6.10: Simulations sur modèle Simulink à partir de la commande optimale obtenue par programmation dynamique. A gauche : Couples des moteurs électrique, thermique, et de consigne (a) et (b) / Tension des supercondensateurs (c). A droite : Zoom des mêmes grandeurs durant les 200 premières secondes du cycle NEDEC (d), (e), et (f).

D'après les courbes obtenues, la tension des supercondensateurs évolue entre 16 V et 22 V. On peut la voir décroître de manière continue (Figure 6.10 (f)), par exemple entre  $t = 0$  s et  $t = 70$  s, à cause de la puissance de 140 W qui est prélevée pour alimenter les accessoires. Cependant il ne semble pas qu'une zone de la plage de fonctionnement des supercondensateurs soit privilégiée par rapport à une autre. En ce qui concerne les modes de fonctionnement, on constate que le mode boost n'est jamais utilisé. Ce résultat est particulièrement important : il signifie que d'un point de vue énergétique, il n'est pas rentable d'utiliser ce mode, et s'explique par l'étude de la cartographie, déjà abordée dans la section 6.1, et par les rendements du système StARS.

Il est aisé de constater que le freinage récupératif actuel (limité à -4 Nm pour cet essai) ne permet de récupérer qu'une faible quantité d'énergie, qui reste insuffisante pour compenser la puissance de 140 W prélevée par les auxiliaires au cours du cycle. Ainsi, si le moteur électrique fournit un couple positif durant un mode boost, l'énergie électrique nécessaire à ce couple devra provenir du mode régénération, pour lequel le moteur thermique fournit un surplus de couple destiné à recharger les supercondensateurs.

Le rendement moyen en mode boost se situe autour de  $\eta_{boost} = 60\%$ , tandis que le rendement  $\eta_{regen}$  du mode régénération approche les 80%. Ainsi, si on note  $\mathcal{E}_b$  la quantité d'énergie mécanique produite par l'activation du mode boost pendant une certaine durée, l'énergie mécanique  $\mathcal{E}_r$  qui devra être récupérée pendant une régénération s'écrit

$$\mathcal{E}_r \approx \frac{\mathcal{E}_b}{\eta_{boost}\eta_{regen}},$$

c'est à dire  $\mathcal{E}_r \approx 2\mathcal{E}_b$ , ce qui revient à considérer que, pour qu'il soit valable d'utiliser le mode boost, celui-ci doit être utilisé lorsque le rendement du moteur thermique est deux fois moins bon qu'au point de fonctionnement où le mode régénération est actif. En pratique, cette situation n'arrive pas, notamment parce que le moteur thermique possède un bon rendement.

En ce qui concerne les autres modes, le mode régénération est bien actif dans certaines conditions, en particulier lorsque le couple de consigne est faible, ce qui correspond à une vitesse du véhicule qui est constante (voir Figure 6.10 droite). Le couple de régénération reste la plupart du temps supérieur ou égal à -3 Nm, les couples de -4 Nm correspondant au couple appliqué lors des freinages récupératifs.

La consommation de carburant optimale, obtenue avec les résultats de programmation dynamique, atteint 430,2 g sur le cycle NEDC, c'est à dire 107,42 g/km de CO<sub>2</sub>. Cette consommation est calculée avec un modèle statique du moteur thermique, qui donne la consommation de carburant en fonction du couple  $T_e$  et du régime  $\omega_e$ .

Pour un véhicule identique, en l'absence de stratégie de gestion d'énergie, l'alternateur doit fournir la puissance électrique de 140W, prélevant constamment un faible couple sur le moteur thermique. Lorsque le freinage récupératif est inactif, la consommation de carburant est de 435,4 g, soit 108,72 g/km de CO<sub>2</sub>, la stratégie optimale permettant de ne gagner que 1,2 % sur la consommation de carburant. En activant le freinage récupératif, la consommation de carburant décroît faiblement à 433,4 g, soit 108,22 g/km de CO<sub>2</sub>, ce qui indique que le freinage récupératif contribue peu à la réduction de la consommation de carburant.

### Résultats sur modèle AMESim

Dans un second temps, il est intéressant de tester la commande optimale, déterminée par la programmation dynamique, sur le modèle AMESim, dont le comportement est davantage représentatif du véhicule. Ce modèle est représenté sur la Figure 6.14. Dans le but d'optimiser la répartition de couple, le modèle AMESim est simulé une première fois pour obtenir la consigne de couple du conducteur, qui diffère, par différents points, de celle qui est déterminée par un modèle *backward* tel que celui utilisé au début de la section 6.6.5 :

- Le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur donnant lieu à un ratio (d'enfoncement pédale), celui-ci est alors interprété par le contrôle moteur comme une consigne de couple, cette consigne est donc positive ou nulle.
- Le modèle AMESim est un modèle *forward* : un modèle de conducteur se charge de suivre le cycle de vitesse, en anticipant les accélérations et les freinages. La consigne de couple est donc, en ce sens, différente de celle d'un modèle *backward*.
- Le freinage récupératif est automatiquement actif dès que le conducteur cesse d'accélérer, afin d'augmenter l'effet ressenti comme un frein moteur, tout en récupérant de l'énergie.

L'approche consiste ensuite à utiliser la consigne de couple optimale, déterminée par la programmation dynamique, sur le modèle AMESim.

Les résultats obtenus sur le modèle AMESim sont représentés sur la Figure 6.11,

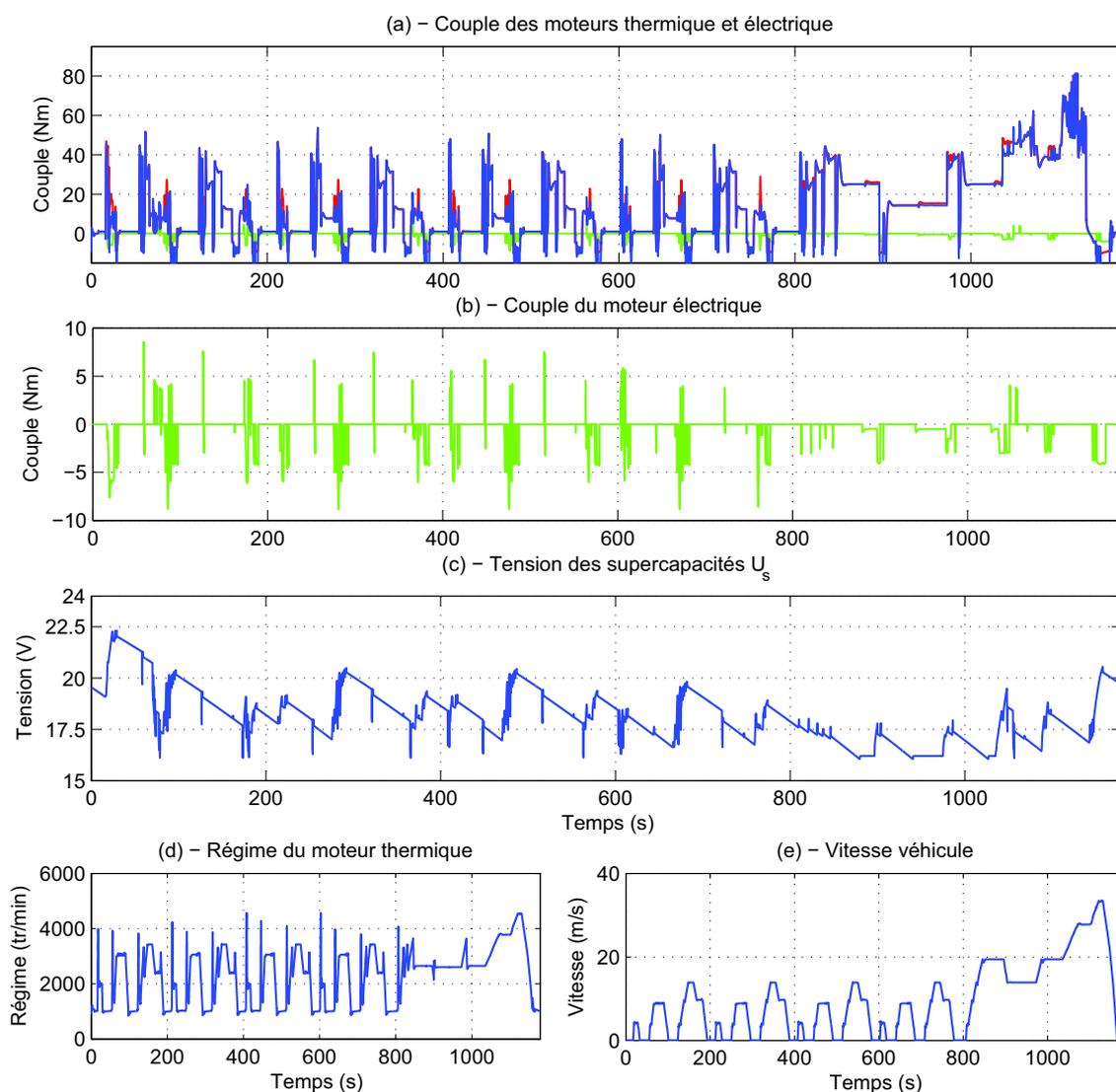


FIG. 6.11: Simulations sur modèle AMESim à partir de la commande optimale obtenue par programmation dynamique. Evolution de la tension des supercapacités contrôlée par la loi de commande obtenue par la programmation dynamique.

Contrairement au modèle backward, le modèle AMESim représente les principaux actionneurs du groupe motopropulseur : le moteur thermique avec turbo, les échanges de température, mais aussi la boîte de vitesse et l’embrayage. En particulier, les actionneurs que sont le moteur thermique et le moteur électrique possèdent des dynamiques qui ne sont pas prises en compte lors de la résolution du problème de commande optimale par la programmation dynamique. De plus, la présence d’un modèle de conducteur, qui anticipe les accélérations et les freinages, modifie la consigne de couple par rapport à un modèle backward, utilisé pour le calcul de la consigne de couple pour le modèle Simulink. Comme l’indique la Figure 6.11 (d), le moteur thermique reste allumé tout au long de l’essai, le Stop-and-Start restant inactif.

On remarque par ailleurs que le moteur électrique est parfois utilisé pour faire du boost, même si cela reste pour de faibles durées.

Après simulation, la consommation obtenue atteint 453 g de carburant sur cycle NEDC, c’est à dire 113,52 g/km de  $CO_2$ , contre 458 g en utilisant l’alternateur pour la fourniture de l’énergie nécessaire

## 6.7 Développement de lois temps-réel

---

auxiliaires (sans freinage récupératif). On retrouve un gain similaire au précédent : 1,1 % de gain en consommation, ce gain étant dû à la loi de répartition de puissance optimale ainsi qu'au freinage récupératif.

### 6.6.6 Discussion des résultats

A la vue des résultats obtenus, cette architecture ne permet pas d'obtenir un gain dépassant les 2 % sur cycle NEDC. Comme cela a été mentionné dans la section 6.6.5, les rendements du système électrique en mode boost et régénération ne sont pas suffisants pour qu'il soit intéressant, d'un point de vue de la réduction de la consommation, d'utiliser successivement ces deux modes sur le cycle NEDC. En conséquence, le moteur électrique n'est quasiment utilisé que pour la consommation de courant des auxiliaires.

Malgré les conclusions qui tendent à minimiser l'attrait de cette architecture sur un véhicule de type Smart, le développement d'une loi de répartition d'énergie revêt néanmoins un intérêt pour plusieurs raisons :

1. La puissance consommée par les auxiliaires représente une certaine partie de la consommation de carburant, qui peut donc être minimisée, comme cela a été montré.
2. Le freinage récupératif, activé dès lors que la pédale d'accélérateur était relâchée durant ces essais, ne donnait lieu qu'à un faible couple, de -4 Nm. Une meilleure gestion de ce freinage permettrait sans nul doute de récupérer d'avantage d'énergie.
3. L'un des objectifs de ce véhicule est de proposer une motorisation thermique moins puissante et moins consommatrice de carburant, qui puisse être épaulée par un moteur électrique. Dans ce contexte, une loi de gestion d'énergie est nécessaire pour pouvoir disposer d'une énergie dans les supercapacités qui soit suffisamment importante pour pouvoir utiliser le moteur électrique à chaque instant.

## 6.7 Développement de lois temps-réel

Pour le contrôle du moteur électrique, il est plus aisé de découpler la commande du Stop-and-Start, de la commande du moteur électrique visant à réduire la consommation de carburant.

### 6.7.1 Stop-and-Start

Le Stop-and-Start correspond à un arrêt du moteur thermique, suivi d'un redémarrage rapide de celui-ci. Pour activer le Stop-and-Start, c'est à dire pour autoriser l'arrêt du moteur thermique, la situation idéale serait de connaître la durée de l'arrêt du véhicule, pour savoir s'il est rentable d'un point de vue énergétique de stopper le moteur thermique. Il suffit en effet de comparer l'énergie nécessaire à un redémarrage (carburant injecté jusqu'au ralenti, ajouté à l'énergie électrique nécessaire à l'entraînement du moteur thermique) avec l'énergie économisée si le véhicule avait été au ralenti, pour déterminer s'il est plus intéressant de couper le moteur thermique ou non, selon la durée de l'arrêt.

Dans ces conditions, de simples règles sont généralement suffisantes pour déterminer quand éteindre le moteur thermique, et quand il doit être rallumé. On pourra utiliser les règles suivantes :

- arrêt du moteur thermique si la vitesse des roues passe en dessous de 6 km/h, si la pédale de frein est enfoncée, et si la tension des supercapacités est suffisante pour assurer un redémarrage.
- démarrage du moteur thermique dès que le frein est relâché.

### 6.7.2 Loi temps-réel pour la gestion d'énergie (ECMS)

La loi temps-réel qui a été choisie pour contrôler le moteur électrique est L'ECMS (voir section 5.1.3). Basée sur une minimisation de la consommation équivalente, elle consiste à considérer les supercapacités (ou bien, d'une manière plus générale, l'élément où est stockée l'énergie électrique) comme un réservoir additionnel. L'ECMS choisit ensuite la source d'énergie la moins 'chère', parmi les deux sources.

Pour cela, on forme l'Hamiltonien, correspondant à la variation d'énergie globale sur un pas de temps  $\Delta t$ , tel que

$$H(u, t, p) = L(u, t)\Delta t + p\mathcal{E}_{elec}(u, t)\Delta t, \quad (6.23)$$

où  $L\Delta t$  représente la variation de la consommation de carburant sur un pas de temps  $\Delta t$ , et  $\mathcal{E}_{elec}\Delta t$  correspond à la variation d'énergie électrique sur ce même pas de temps. Dans cette stratégie, le contrôle optimal est donc celui qui minimise l'Hamiltonien par rapport à  $u$ , en prenant en compte toutes les contraintes. On utilise les modèles décrits dans la section 6.4 pour l'évaluation des quantités  $L(u, t)\Delta t$  et  $\mathcal{E}_{elec}(u, t)\Delta t$ .

Dans cette stratégie, la variation de l'état de charge est habituellement choisi comme image de la variation de la quantité d'énergie électrique prélevée. Ici, nous ne disposons que de la tension  $U_s$  et de sa variation  $\mathcal{U}_s$ . Comme la variation  $\Delta t\mathcal{U}_s$  dépend de  $U_s$ , nous considérons plutôt la variation de l'énergie électrique contenue dans les supercapacités. Cette énergie s'écrit  $E_{elec} = \frac{1}{2}CU_s^2$ , ce qui mène donc à

$$\mathcal{E}_{elec} = CU_s\mathcal{U}_s. \quad (6.24)$$

Ainsi, on cherche la commande  $u^*$  qui minimise

$$H(u, t, p) = L(u, t)\Delta t + pCU_s(u, t)\mathcal{U}_s(u, t)\Delta t \quad (6.25)$$

sous les contraintes de couples maximal et minimal des deux moteurs. En choisissant une telle forme pour l'Hamiltonien,  $p$  est idéalement constant lorsque la tension  $U_s$  évolue librement dans sa plage de fonctionnement. On s'assure d'autre part que cette hypothèse est juste, les mesures de rendement du système StARS, dans les modes moteur et régénération, indiquant un rendement presque constant quelle que soit la tension de fonctionnement  $U_s$ .

Le contrôleur implémenté dans la structure générale du contrôle moteur du véhicule tient compte de toutes les contraintes inhérentes au véhicule, et en particulier des hypothèses suivantes :

- Le mode régénération du moteur électrique ne peut être actif en dessous de  $\omega_e = 1500$  tr/min. Cette contrainte n'a pas lieu d'être, néanmoins elle est intégrée au contrôleur Valeo <sup>1</sup>.
- Pour récupérer davantage d'énergie lors du ralentissement du véhicule, on a appliqué un freinage de  $T_m = -2,5$  Nm dès que l'injection de carburant est coupée. Ce freinage n'est pas à proprement parler un freinage récupératif, puisque la pédale de frein n'est pas actionnée. Néanmoins, cela permet de récupérer un peu d'énergie tout en ralentissant un peu plus le véhicule (sans que cela devienne désagréable pour le conducteur, du point de vue de l'agrément).

---

<sup>1</sup>Cette valeur est historique : sur d'anciens projets Valeo, la solution StARS était montée en liaison avec le moteur thermique avec un rapport de réduction de 3. La limite de régénération était fixée à  $\omega_e = 1000$ tr/min, soit  $\omega_m = 3000$  tr/min. La valeur de cette limitation n'ayant pas été modifiée par l'équipementier, on la retrouve au régime  $\omega_e = 3000/1,96 \simeq 1500$  tr/min, le rapport de réduction de la VEHGAN étant de 1,96.

### 6.7.3 Structure du contrôle sur le véhicule

#### Contrôle en couple

Le moteur thermique est contrôlé de façon à prendre en compte la dynamique de ses actionneurs. En particulier, sur un moteur, le contrôle de la boucle d'air et de la boucle de carburant est déterminant pour assurer un bon suivi de la trajectoire de couple, mais aussi pour obtenir un mélange proche du mélange stoechiométrique (minimise les rejets de polluants). Si l'injection de carburant dans le cylindre est quasi-instantanée, il n'en est pas de même pour la boucle d'air. En effet, l'alimentation en air est assurée par un papillon motorisé, dont la dynamique est rapide, mais c'est ensuite le collecteur d'admission qui joue le rôle de filtre et retarde l'entrée de l'air dans le cylindre.

La boucle d'air et la boucle de carburant ont donc deux dynamiques assez différentes. Sur véhicule, pour s'assurer que la richesse du mélange reste proche de 1, on a recourt à une estimation de la quantité d'air dans le cylindre. Cette estimation est phasée avec la mesure de la quantité d'air dans le cylindre lors de phases de fonctionnement stabilisé ; par contre, pendant les phases transitoires, l'estimation est en retard par rapport à la consigne de masse d'air, ce qui permet à la boucle de carburant d'injecter une quantité de carburant calée sur la quantité d'air réellement présente dans le cylindre.

Dans l'ECMS, on évalue la quantité de carburant nécessaire à la production d'un couple par le moteur thermique, couple qui est calé par rapport à la consigne de couple du conducteur, mais aussi par rapport au couple du moteur électrique. Cette approche n'est donc pas adaptée au contrôle actuellement utilisé, dans le sens où l'injection de carburant est corrélée à la mesure de la quantité d'air dans le cylindre, alors que le conducteur commande le papillon motorisé sans commander directement la quantité d'essence injectée.

#### Compromis contrôle optimal / agrément

L'ECMS consiste à minimiser l'Hamiltonien en temps-réel selon l'équation (6.25).

On définit par  $u_{t_k}^j$ ,  $j = 1, \dots, 11$  les commandes testées à chaque instant  $t_k$ . Le vecteur de commandes comporte onze composantes (voir section 6.6.4). La commande optimale  $u_{t_k}^*$  est la  $j^{\text{ième}}$  composante du vecteur de commandes qui minimise l'Hamiltonien, tout en vérifiant les contraintes provenant des actionneurs (contraintes sur la commande) et des supercapacités (contraintes sur l'état).

Cette minimisation en temps-réel peut donner lieu à des variations rapides du contrôle sous-optimal déterminé par l'ECMS, qui ne sont pas acceptables d'un point de vue de l'agrément, et qui ne seraient pas réalisables par les actionneurs. Pour pallier à ce phénomène, on applique une pondération à l'Hamiltonien  $H$ , et on forme  $\tilde{H}$  selon la loi suivante

$$\tilde{H}(u, t, p) = H(u, t, p) + g(u_{t_k}, u_{t_{k-1}}^*) \quad (6.26)$$

$$\text{avec } g(u_{t_k}, u_{t_{k-1}}^*) = \begin{cases} -a & \text{si } u_{t_k} = u_{t_{k-1}}^*, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

où  $a$  est une valeur déterminée expérimentalement<sup>2</sup> lors d'essais en simulations, en étudiant l'évolution de l'Hamiltonien au cours du temps pour l'ensemble des commandes.

On ne cherche alors plus à minimiser l'Hamiltonien  $H$ , mais la fonction  $\tilde{H}$ . Cette pondération revient à favoriser le choix d'une commande qui était celle du pas précédent<sup>3</sup>, parmi les commandes admissibles. En contrepartie, la consommation de carburant devrait être un peu dégradée.

<sup>2</sup>On aurait dû considérer non pas  $-a$  mais  $-aU_s$ , l'Hamiltonien évoluant selon  $U_s \Delta U_s$ . Néanmoins, les résultats présentés ont été obtenus avec une pondération égale à  $-a$ .

<sup>3</sup>En réalité on ne considère pas les commandes  $u_{t_k}$  et  $u_{t_{k-1}}^*$ , mais les composantes du vecteur de commande.

### 6.7.4 Contrôle de $p$

Beaucoup d'auteurs ont présenté leur travaux concernant le contrôle du multiplicateur  $p$  (voir section 5.1.3). Étant donnée la faible plage de variation de la tension, c'est à dire entre 16V et 24V, on fait l'hypothèse que l'efficacité de la supercapacité est constante sur toute la plage de fonctionnement. D'après la section 5.1.3, on a donc nécessairement  $\dot{p} = 0$  tant qu'aucune contrainte sur l'état n'est active.

Aussi, le contrôle de  $p$  qui est utilisé sur le véhicule est le suivant :

- Si  $16 + \Delta U < U_s < 24 - \Delta U$ ,  $p(t) = \text{constante} = p_0$ .
- Si  $16 + \Delta U > U_s$  et si les conditions de fonctionnement sont réunies pour autoriser une régénération (sans que cela soit forcément optimal pour autant), alors  $p$  est contrôlé par un intégrateur, i.e.  $p(t) = p(t - \delta t) + K_1 \delta t$ , avec  $K_1 > 0$ .
- Si  $U_s < 24 - \Delta U$  et si les conditions de fonctionnement sont réunies pour autoriser un fonctionnement en mode boost, (sans que cela soit forcément optimal pour autant), alors  $p$  est contrôlé par un intégrateur, i.e.  $p(t) = p(t - \delta t) - K_2 \delta t$ , avec  $K_2 > 0$ .

où  $\Delta U$  correspond à un seuil de tension, afin d'anticiper la variation de  $p$  près des bornes, et d'éviter que la tension ne franchisse celles-ci.

Les gains  $K_1$  et  $K_2$  jouent donc le rôle du contrôle de  $p$  lorsque l'on active une contrainte sur l'état. Ces gains ont été optimisés à l'aide du modèle sous Simulink sur le cycle NEDC, en appliquant la commande boucle ouverte obtenue par l'ECMS. L'idée est de rechercher les valeurs de  $K_1$  et de  $K_2$  qui minimisent la consommation.

La Figure 6.12 donne l'allure de la variation de consommation pour différentes valeurs de  $K_1$  et de  $K_2$ . On remarque que la consommation de carburant est plus importante lorsque  $K_1$  est faible, ce qui s'explique par un rendement du moteur électrique légèrement moins bon à faible tension. De la même manière, le rendement du moteur électrique étant légèrement meilleur aux tensions plus élevées, le gain  $K_2$  reste faible. Malgré la faible différence de consommation (qui reste inférieure à 0,25 %) selon les valeurs de  $K_1$  et de  $K_2$ , la consommation optimale est obtenue pour  $K_1 = 0,16$  et  $K_2 = 0,08$ .

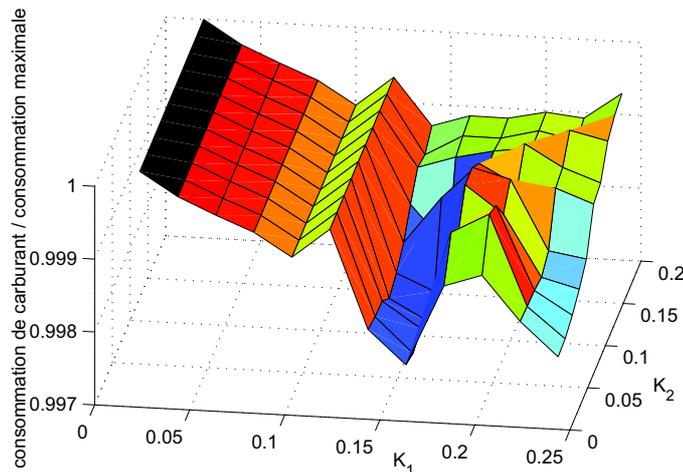


FIG. 6.12: Allure de variation de consommation de carburant sur cycle NEDC selon les gains  $K_1$  et  $K_2$ .

La Figure 6.13 donne l'allure de la tension  $U_s$  et du multiplicateur de Lagrange  $p$  sur le cycle NEDC avec la loi ECMS, en simulation avec le modèle Simulink. La tension initiale  $U_s$  a ici été choisie égale à 15V, comme c'est le cas sur véhicule lors d'un essai normalisé. Néanmoins, les valeurs de  $K_1$  et  $K_2$  obtenues pour  $U_s(t = 0) = 15$  V conviennent aussi pour des tensions initiales supérieures, la valeur initiale  $p_0$  ayant été bien choisie.

## 6.8 Résultats de la stratégie ECMS

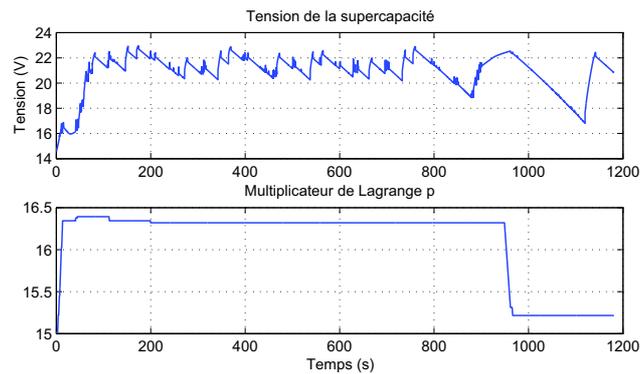


FIG. 6.13: Allure de la tension  $U_s$  et du multiplicateur de Lagrange associé  $p$

## 6.8 Résultats de la stratégie ECMS

### 6.8.1 Tests en simulation - comparaison lois optimales / sous-optimales

Les tests ont été menés sur un modèle *forward* sous environnement AMESim, qui comporte un modèle de conducteur, chargé de suivre une consigne de vitesse. On rappelle que ce modèle ne permettait pas, au moment de ces travaux, de simuler le mode Stop-and-Start : les résultats de simulation suivants correspondent à une gestion d'énergie sans Stop-and-Start. La Figure 6.14 représente le modèle utilisé.

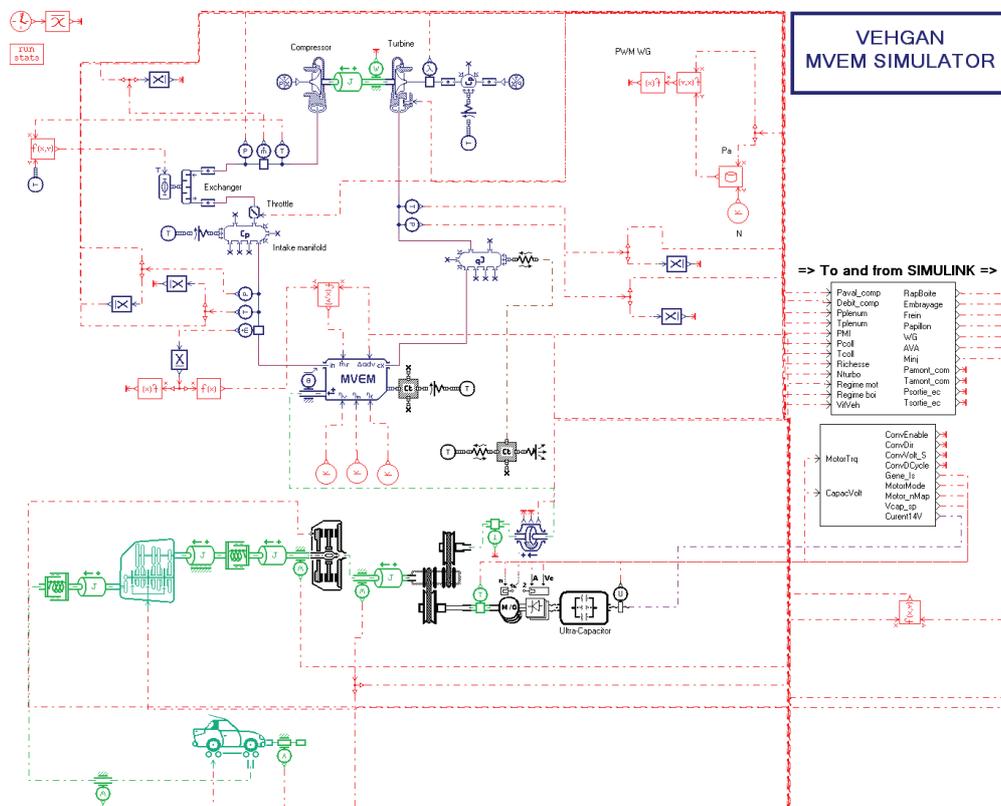


FIG. 6.14: Modèle AMESim de la VEHGAN utilisé en co-simulation.

Les modèles du moteur électrique et des supercapacités sont les mêmes que ceux qui sont utilisés dans l'ECMS. La détermination de la valeur initiale de  $p$  a été effectuée à l'aide d'essais successifs, de façon à ce que la tension ait tendance à rester entre ses bornes 16 V et 24 V.

La Figure 6.15 montre les courbes d'évolution des principales grandeurs sur le cycle NEDC.

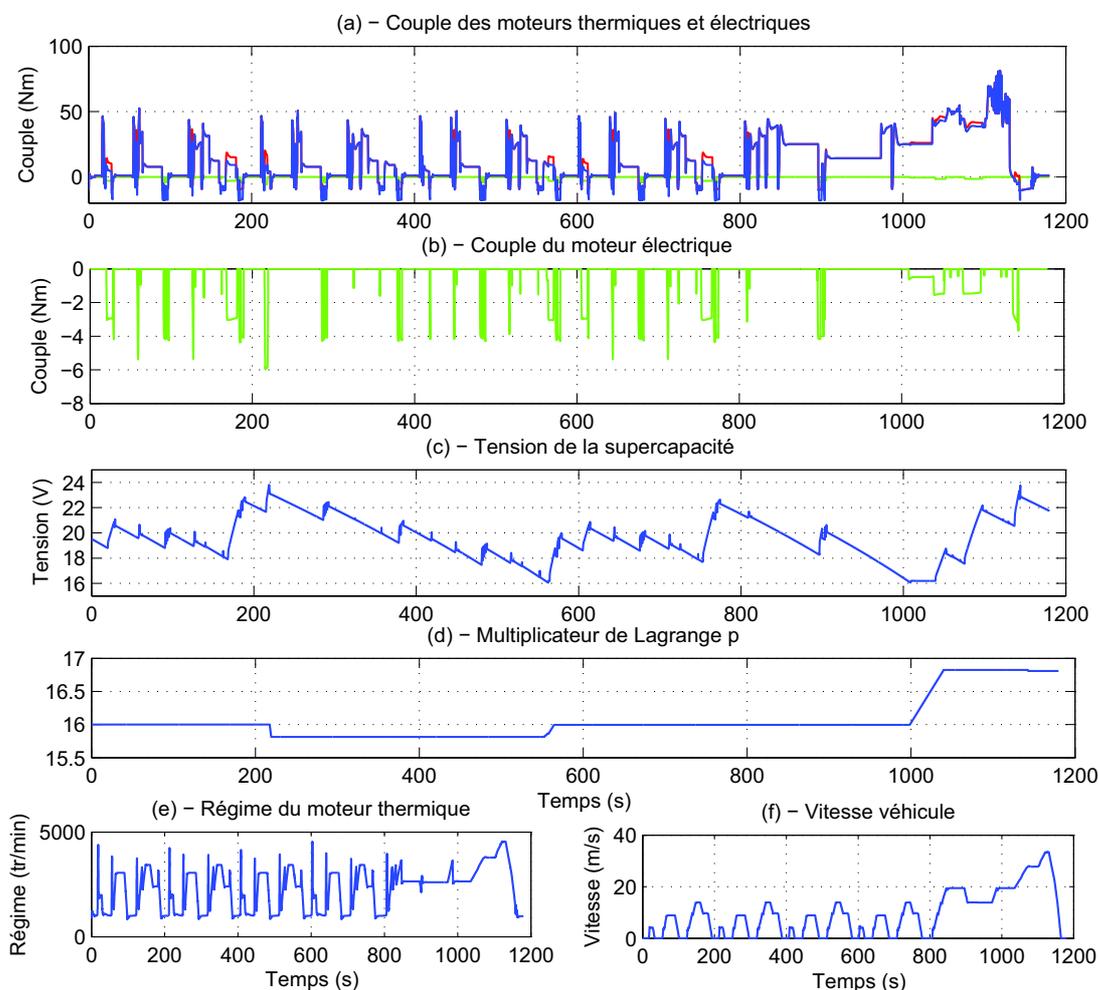


FIG. 6.15: Couple de consigne, couple de consigne du moteur thermique, et couple de consigne du moteur électrique (a), couple de de consigne du moteur électrique (b), Tension supercapacité (c), commande  $p$  (d), régime du moteur thermique (e), et vitesse véhicule (f) en simulation sur cycle normalisé NEDC avec la loi ECMS.

Cette stratégie a permis d'obtenir une consommation de 452,7 g, soit 113,4 g de  $\text{CO}_2$ , pour une tension finale de 21,73 V. Ainsi, on retrouve à peu près les mêmes résultats de ceux obtenus avec la programmation dynamique. Le tableau 6.2 regroupe les résultats obtenus sur le modèle AMESim.

Les résultats de programmation dynamique doivent normalement refléter le gain maximal que l'on peut obtenir avec la loi de commande optimale. Ici, on remarque immédiatement que l'ECMS permet d'obtenir des résultats légèrement meilleurs que ce que permet la programmation dynamique. On peut expliquer cette différence par plusieurs raisons :

- Les pas de discrétisation choisis, dans le calcul de programmation dynamique, n'étaient pas suffisamment fins. Le contrôle optimal retenu est donc très sous-optimal lorsqu'il est appliqué sur un pas de temps trop long.

## 6.8 Résultats de la stratégie ECMS

---

TAB. 6.2: Valeur de consommation de carburant sur le cycle NEDC en simulation

	Therm. pur	Therm. pur & récup. freinage	Prog. Dyn.	ECMS
Consommation (g)	458	454,1	453	452,7
Emissions de CO <sub>2</sub> (g/km)	114,7	113,8	113,52	113,44

- Les changements brusques de la commande du moteur électrique (par exemple passage du mode boost au mode régénérateur) peuvent en fait être néfastes pour la minimisation de la consommation. Pour l'ECMS, la mise en place d'une prise en compte de la commande précédente (voir section 6.7.3) permet d'éviter ce type de basculement.

Néanmoins, on remarque que l'ensemble de ces consommations sont proches, le potentiel de ce véhicule restant assez limité.

### 6.8.2 Tests sur véhicule réel

Après la mise au point de la stratégie de gestion d'énergie grâce à des modèles représentatifs du véhicule, celle-ci a été testée directement sur véhicule. L'objectif est double :

1. Obtenir un comportement de la tension  $U_s$  qui soit conforme aux attentes. En ce sens, la tension doit évoluer "librement" entre ses bornes, sans rester longtemps sur l'une d'elle. Dans le cas où la tension s'approche d'une borne, la commande module la valeur de  $p$  de telle manière à ce que la tension s'éloigne de la borne, en favorisant l'un ou l'autre des modes de fonctionnement du moteur. Les bornes sur la tension pourront ensuite être adaptées à la conduite souhaitée : pour une conduite "sportive", la tension devra rester assez élevée, afin de disposer d'une source d'énergie dans le cas où le mode boost est activé. Dans le cas d'une conduite souple, on donnera la priorité à la minimisation de la consommation
2. Minimiser la consommation de carburant par rapport à celle du véhicule conventionnel.

Sur ces essais à bord du véhicule, la supercapacité fournit l'énergie nécessaire aux accessoires, via le convertisseur DC/DC. En conséquence, lorsqu'il n'y a pas de régénération, la tension de la supercapacité  $U_s$  décroît presque linéairement avec le temps.

#### Test sur véhicule réel sur un trajet quelconque

Les premiers tests menés sur véhicule, sur un trajet quelconque, avaient pour objectif de tester la stratégie développée et de s'assurer que la mise en route et l'arrêt du moteur électrique étaient transparents pour le conducteur. Durant cet essai, le Stop-and-Start a été désactivé.

La Figure 6.16 indique l'allure de la tension  $U_s$  et du multiplicateur  $p$  lorsque l'on se rapproche de l'une ou l'autre des bornes, sur un trajet quelconque.

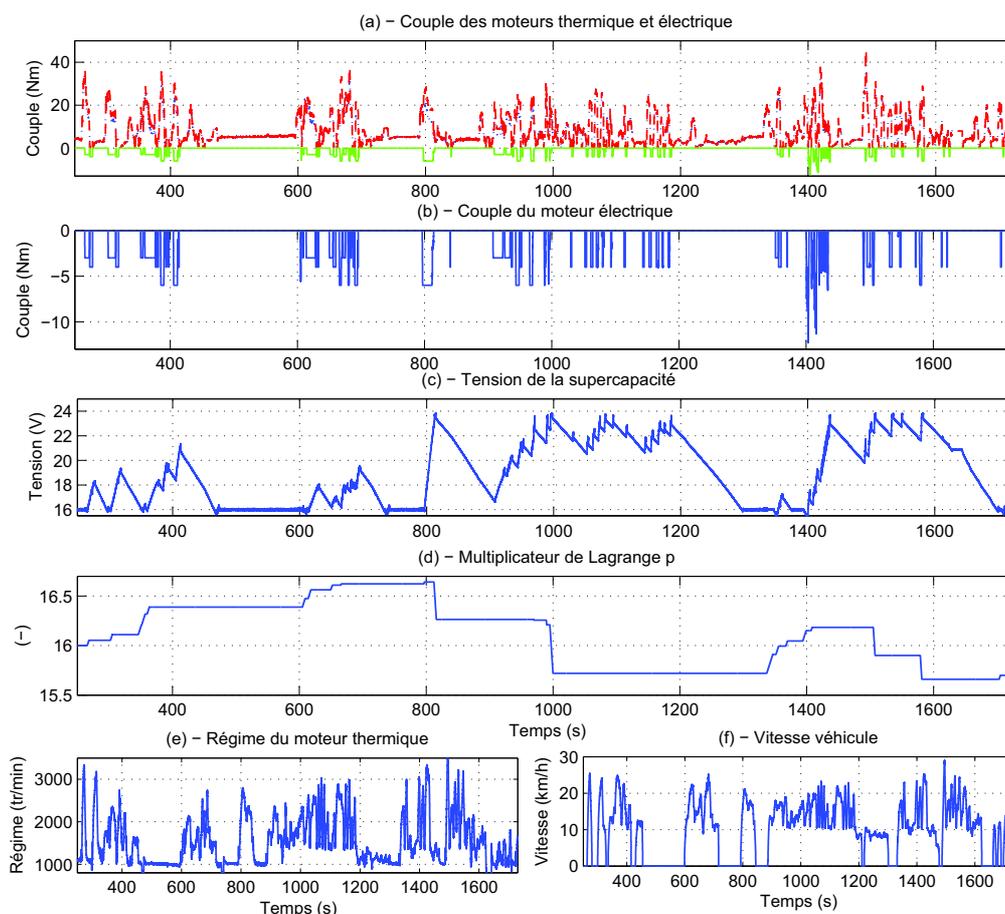


FIG. 6.16: Couple de consigne, couple de consigne du moteur thermique, et couple de consigne du moteur électrique (a), couple de de consigne du moteur électrique (b), tension supercapacité (c), commande  $p$  (d), régime du moteur thermique (e), et vitesse véhicule (f) - Mesures sur véhicule, sur une portion de route avec la loi ECMS, sans Stop-and-Start.

On constate que la tension reste entre les valeurs limites 16 V et 24 V, le multiplicateur  $p$  évoluant de manière à forcer le moteur électrique à recharger la supercapacité lorsque cela est nécessaire. Le moteur thermique fournit alors un surplus de couple pour compenser le couple du moteur électrique. Entre les temps  $t = 470$  s et  $t = 600$  s, on peut voir que le mode alternateur est utilisé, puisque la tension est maintenue à 16 V. Ce mode est utilisé ici comme un mode de secours, pour s'assurer que la tension des supercapacités ne diminue pas. Durant cette période, le multiplicateur  $p$  n'est pas incrémenté, puisqu'on ne se trouve pas dans des conditions où la régénération est possible. Sans cette précaution,  $p$  pourrait être incrémenté tant que la tension  $U_s$  n'a pas quitté la contrainte, alors qu'elle n'a pas les moyens de le faire, puisque les conditions requises pour la régénération ne sont pas présentes.

### Test sur véhicule réel sur Cycle NEDC

La même stratégie a été testée sur véhicule pour un suivi du cycle normalisé NEDC (voir section 1.2.1). L'essai a été réalisé dans les conditions suivantes : le moteur est froid, la tension initiale des supercapacités se situe autour de 15 V. Pour cet essai, le Stop-and-Start a été activé, et permet donc de limiter la consommation de carburant lors des phases de ralenti. En contrepartie, la tension décroît à chaque démarrage du moteur thermique, la supercapacité étant utilisée pour l'entraînement du moteur

## 6.8 Résultats de la stratégie ECMS

électrique utilisé comme un démarreur.

Enfin, pour récupérer un peu d'énergie électrique durant les freinages, le mode régénération est activé dès que le conducteur presse la pédale de frein, le moteur électrique prélevant alors un couple constant  $T_e = -2,5$  Nm. La valeur initialement appliquée de  $-4$  Nm pour le couple de régénération a été jugée trop importante à la suite de quelques tests sur véhicule, c'est pourquoi elle a été réduite à  $-2.5$  Nm.

Sur la Figure 6.17 sont représentés la tension de la supercapacité et le multiplicateur de Lagrange  $p$ , ainsi que les principales grandeurs représentatives de l'essai.

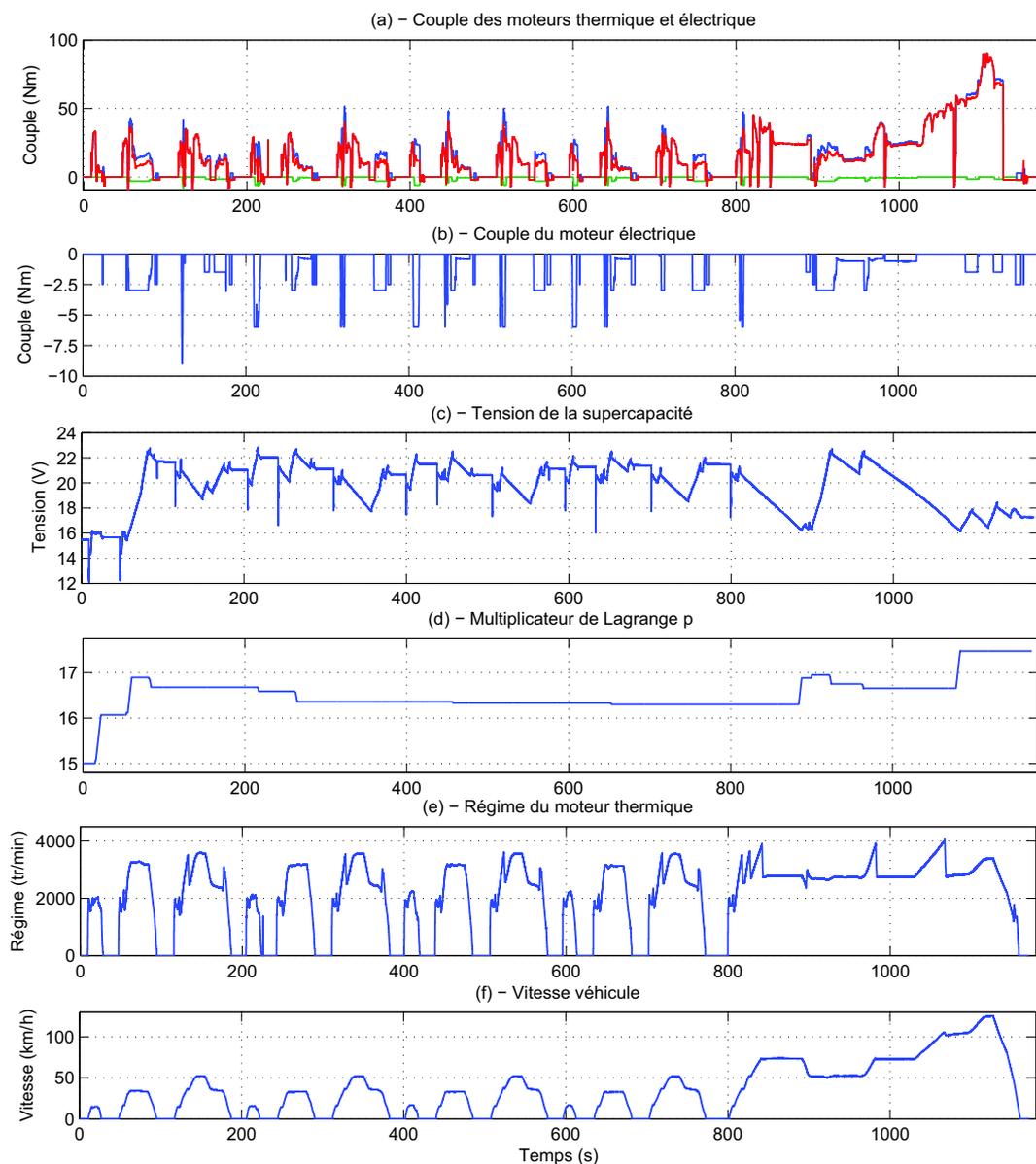


FIG. 6.17: Couple de consigne conducteur, couple de consigne du moteur thermique, et couple de consigne du moteur électrique (a), couple de consigne du moteur électrique (b), Tension supercapacité (c), commande  $p$  (d), régime du moteur thermique (e), et vitesse véhicule (f) pour le véhicule Smart sur cycle normalisé NEDC avec la loi ECMS.

La tension évolue bien d'une borne à l'autre et sans les franchir, la commande du multiplicateur  $p$

permettant de favoriser ou non une recharge de la supercapacité. La valeur initiale  $p_0 = 15$  a été choisie en connaissance de la faible tension au début du cycle ( $U_s = 15$  V), il fallait donc que  $p_0$  soit assez élevée pour favoriser la recharge, et suffisamment faible pour qu'après avoir quitté la contrainte  $U_s = 16$  V, la valeur du multiplicateur  $p$  ne soit pas trop grande. D'après la trajectoire de  $p$ , et sa valeur à la fin des quatre cycles ECE (à  $t=800$  s) la valeur optimale de celui-ci se situe autour de 16,3 pour un trajet urbain. Sa valeur augmente sur la fin du cycle, le borne  $U_s = 16$  V ayant été approchée à plusieurs reprises.

Sur la première partie du cycle, les chutes de tension sont provoquées soit par les démarrages (chutes brusques), soit par la consommation de courant des auxiliaires (baisse continue). On peut observer qu'au début du cycle, la tension passe ponctuellement sous les 16V après un redémarrage, la tension initiale étant de 15 V et les conditions de régénération n'étant alors pas remplies (couple de consigne trop important / régime trop faible / etc.) pour qu'une régénération des supercapacités soit autorisée.

D'après la courbe (b) de la Figure 6.17, le couple de freinage atteint rarement le couple exact -2,5 Nm, ce qui indique que le mode freinage récupératif est rarement utilisé. On explique cela par plusieurs raisons :

- Le freinage récupératif est dû au mode régénération, avec lequel on applique un couple dès que la pédale de frein est enfoncée. Néanmoins, il n'est possible de freiner le véhicule de cette manière que lorsqu'un rapport est engagé. Dans le cas contraire, les moteurs thermique et électrique sont découplés du train moteur, et donc des roues. Le freinage du véhicule est alors assuré par le système de freinage mécanique.
- La limitation en régime, interne au contrôleur Valeo, empêche d'utiliser le mode régénération sous la vitesse de  $\omega_e = 1500$  tr/min.
- Le ralentissement naturel du véhicule apporté par le frein moteur (lorsque le conducteur relâche la pédale d'accélérateur) est souvent suffisant pour ralentir le véhicule, sans que le conducteur n'ai besoin de freiner davantage.

Ces raisons expliquent notamment que la tension soit si peu élevée à la fin du cycle, et malgré le grand freinage de 130 km/h jusqu'à 0 km/h propre au cycle NEDC.

Cet essai réalisé au banc à rouleaux dans des conditions valides a permis, grâce à cette stratégie, d'obtenir des émissions de 93,2 g/km de CO<sub>2</sub>, ce qui constitue le meilleur résultat à ce jour pour ce véhicule. A titre de comparaison, un essai similaire obtenu avec Stop-and-Start, mais sans freinage récupératif ni gestion énergétique (donc la stratégie ECMS présentée), avait permis d'obtenir des émissions de 95 g/km de CO<sub>2</sub> quelques jours auparavant. Durant cet essai, la recharge des supercapacités était réalisée au moyen du mode alternateur, qui maintenait alors la tension à 16 V, celle-ci étant ponctuellement dépassée lors des freinages.

Le gain apporté par cette stratégie est donc de 1,9 % sur le cycle NEDC pour ce véhicule. Ce gain peut paraître faible, néanmoins il constitue un très bon résultat aux vues des nombreuses contraintes qui pèsent sur ce véhicule, dues aux limitations de son architecture (faible énergie récupérée durant un freinage récupératif pour un micro-hybride) et en particulier de son moteur électrique qui est très limité en mode boost.

## 6.9 Conclusion / Perspectives

Cette étude a permis de mettre en oeuvre une loi de gestion d'énergie adaptée à un véhicule de type micro-hybride. En particulier, un module de gestion énergétique a été développé sous Simulink, et intégré au contrôle moteur du véhicule.

Ce module utilise une loi de commande sous-optimale basée sur le principe de Pontryagin, celle-ci permettant de favoriser une recharge ou une décharge des supercapacités en fonction d'un seul et unique paramètre  $p$ . Pour pouvoir appliquer cette stratégie connue sous le nom d'ECMS, des modèles représentatifs de l'architecture hybride, et en particulier de chaque source d'énergie, ont été développés.

La stratégie a ensuite été testée sur le cycle normalisé NEDC sur véhicule réel, et dans des conditions valides pour ce type d'essai. Malgré les nombreuses limitations de cette architecture, les résultats sont "relativement bons", atteignant presque 2% de gain en émission de CO<sub>2</sub> par rapport à une stratégie qui maintient simplement la tension à  $U_s = 16V$ .

Parmi les perspectives, la stratégie actuelle pourrai probablement être améliorée, par exemple en testant davantage de couples admissibles pour chacun des modes (il y en a 5 pour chaque mode actuellement).

De plus, l'amélioration de la gestion du freinage récupératif permettrait sans aucun doute de gagner encore un peu d'énergie électrique. À l'heure actuelle, le freinage mécanique reste indépendant du freinage que peut apporter le moteur électrique. Une interface doit donc être créée pour permettre le dialogue entre le contrôle de l'ABS, et celui du moteur électrique.

En ce qui concerne la gestion d'énergie, celle-ci pourra aussi être adaptée à la conduite souhaitée : par exemple garder une réserve d'énergie importante pour une utilisation intensive du mode boost, ou bien laisser totalement la main à la loi de gestion d'énergie, quitte à laisser la tension descendre jusqu'à 16 V, cette valeur interdisant alors l'utilisation du mode boost.