

Réalisation d'un véhicule hybride à partir d'un véhicule grand public

Rodolfo Orjuela¹, Jérôme Ferrari², Mickaël Jondeau², Guillaume Girardin² et Michel Basset¹

¹Laboratoire MIPS EA2332, 12 rue des frères Lumière, F 68093 Mulhouse CEDEX

²VoiDomotik, 1 rue des jardins, F 71118 Saint Martin Belle Roche

rodolfo.orjuela@uha.fr

Résumé

Le secteur de l'automobile en général, et le véhicule hybride en particulier, constitue un vaste domaine de recherche en automatique. La réalisation d'un véhicule hybride constitue alors un excellent moyen d'appliquer et de montrer l'intérêt des techniques de l'automatique (modélisation, simulation et commande) pour faire face à un problème concret. En effet, la transformation d'un véhicule grand public en véhicule hybride se heurte à un nombre important de difficultés techniques et scientifiques, qui vont de la modification et de l'élaboration de certains organes mécaniques jusqu'à la conception d'algorithmes de commande pour la gestion des deux modes de motorisation, en passant par les phases d'intégration de nouveaux actionneurs, d'acquisition et de traitement du signal.

Mots-clés: *véhicule hybride, commande, instrumentation, démonstrateur en automatique.*

1 Introduction

Ce démonstrateur en automatique, baptisé E², est issu de la transformation d'une Peugeot 206 S16 à motorisation thermique en un véhicule hybride [1] comportant deux modes de motorisation, l'un thermique et l'autre électrique. Ce démonstrateur a été élaboré grâce à l'étroite collaboration entre les enseignants-chercheurs de l'équipe MIAM (Modélisation et Identification en Automatique et Mécanique) du laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus et Systèmes EA2332) et les étudiants¹ de l'ENSISA (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace) visant une participation au Trophée SIA organisé par la Société des Ingénieurs de l'Automobile.

L'idée mise en œuvre pour transformer le véhicule d'origine consiste à conserver son moteur thermique en traction et d'ajouter deux moteurs électriques à courant continu au niveau des roues arrière afin de mettre en place une propulsion électrique s'approchant du concept du moteur-roue (Active Wheel). Cette architecture d'hybridation est une architecture de type parallèle dans la mesure où les deux types de motorisations peuvent entraîner les roues [2, 5]. L'utilisation de deux moteurs électriques indépendants rend l'architecture d'hybridation assez originale. Elle présente de nombreux avantages (redondance des actionneurs électriques, etc.) mais se heurte à des problèmes délicats mais très intéressants en termes de commande et de traitement du signal. La réalisation de ce démonstrateur offre ainsi la possibilité d'étudier puis de valider de nombreux concepts en automatique qui vont de la modification et de l'élaboration de certains organes mécaniques jusqu'à la conception d'algorithmes de commande pour la gestion des deux modes de motorisation en passant par les phases d'intégration de nouveaux actionneurs, d'acquisition et de traitement du signal.

1. L'association VoiDomotik a été fondée par des anciens élèves de l'ENSISA fortement impliqués dans ce projet.

Nous exposons, dans cette communication, les principales modifications apportées afin de réaliser un démonstrateur en automatique et traitement du signal à partir d'un véhicule grand public. La Section 2 est dédiée à une présentation générale du démonstrateur réalisé. L'architecture de commande proposée, permettant de gérer les modes de motorisation thermique et électrique, est présentée au cours de la Section 3. La Section 4 propose des résultats de validation du démonstrateur en conditions réelles. Une conclusion et des perspectives sont enfin données au cours de la Section 5.

2 Présentation générale du démonstrateur

Le démonstrateur E² repose sur la transformation en véhicule hybride d'une Peugeot 206 S16 modèle 1999 (homologuée pour les Rencontres Peugeot Sport) à motorisation thermique (Essence), 4 cylindres, 5 rapports de boîte de vitesses et 2 roues motrices. L'idée mise en œuvre consiste à conserver le moteur thermique d'origine en traction sur les roues avant et d'ajouter deux moteurs électriques au niveau des roues arrière afin de mettre en place une propulsion électrique (cf. Figure 1). Un véhicule hybride à quatre roues motrices est ainsi obtenu. Cette architecture d'hybridation est dite de type parallèle [2].



FIGURE 1 – Concept du démonstrateur E²

La combinaison judicieuse de ces deux modes de traction/propulsion permet de proposer soit un véhicule zéro émission en mode électrique, soit un véhicule moins consommateur en carburant en mode hybride combiné. L'originalité du démonstrateur E² proposé provient de son architecture au niveau de la motorisation électrique. En effet, les deux moteurs électriques, à l'arrière du véhicule, se situent à l'extérieur de l'habitacle. Il est ainsi possible de libérer un maximum de place à l'intérieur du véhicule et de s'approcher du concept du moteur-roue (Active Wheel) de Michelin.



FIGURE 2 – Train arrière modifié pour le démonstrateur E²

L'introduction d'une propulsion électrique, telle que celle proposée pour le démonstrateur E², nécessite une modification importante du train arrière du véhicule (cf. Figure 2). En effet,

le train arrière d'origine doit être remplacé afin de loger les deux moteurs électriques. Placer les moteurs à l'extérieur de l'habitacle est une idée innovante qui pose cependant certains problèmes mécaniques. Il faut en particulier gérer les masses non suspendues introduites par les deux moteurs. Afin de surmonter ce problème, les moteurs électriques sont placés près de l'axe de pivot des bras oscillants. La liaison entre le moteur électrique et la roue est réalisée par un réducteur à engrenages à dentures droites. Il convient de remarquer qu'aucune liaison mécanique n'est utilisée entre les deux roues. Le différentiel de vitesse entre les roues, nécessaire lors d'un virage, est calculé par un algorithme de commande suivant la situation de conduite (cf. Section 3.3).

La commande des motorisations thermique et électrique du démonstrateur E², à partir de la pédale d'accélérateur, passe entièrement par un calculateur embarqué avec un module d'acquisition de données. La conception et la mise en œuvre des stratégies de commande permettent d'illustrer clairement les problèmes d'automatique liés à la modélisation d'un système physique et à sa commande. L'architecture de commande est décrite dans la section suivante.

3 Architecture générale de commande

La commande des motorisations à la fois thermique et électrique se fait naturellement par l'action sur la pédale d'accélérateur. Pour ce faire, la pédale d'accélérateur mécanique d'origine a été remplacée par une pédale électrique munie d'un capteur de position. Ce dernier délivre une tension proportionnelle à l'angle de la pédale. Il devient alors possible de concevoir, à partir de cette tension, une stratégie de commande pour les deux types de motorisation. En effet, la tension délivrée par la pédale peut être exploitée pour calculer l'angle d'ouverture du papillon pour la motorisation thermique et/ou pour calculer la tension à appliquer aux moteurs électriques. Cette stratégie de commande est implantée sur une cible temps réel, embarquée dans le véhicule. L'ensemble est représenté sur la Figure 3.

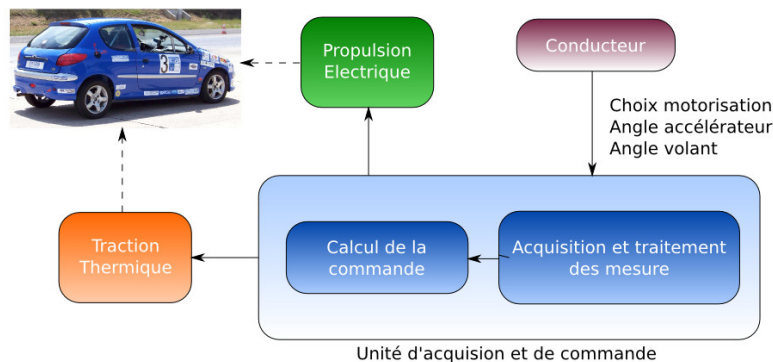


FIGURE 3 – Schéma de principe pour la gestion des motorisations du démonstrateur E²

3.1 Instrumentation du véhicule

L'intégration de ces deux stratégies de commande passe par une phase d'instrumentation du véhicule. Il est, en effet, impératif de mesurer toutes les variables physiques nécessaires à la commande et à la gestion des deux modes de motorisation. L'évolution du démonstrateur au fil du temps a conduit à la modification ou la conception de nouveaux dispositifs de mesure tels que le capteur d'angle papillon, le capteur d'angle volant, la mesure du courant des moteurs, la mesure de la position de la pédale d'accélérateur, etc. Une vue d'ensemble des principaux capteurs installés dans la voiture est illustrée sur la Figure 4. Il est ainsi possible d'illustrer les problèmes liés

à l'acquisition de signaux et/ou traitement du signal (filtrage, etc.).

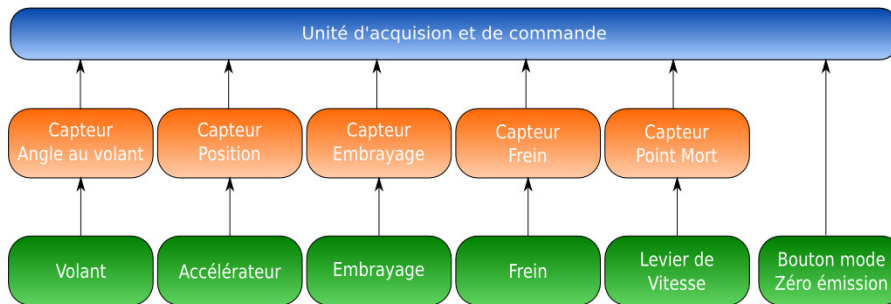


FIGURE 4 – Vue d'ensemble des capteurs du démonstrateur E²

L'ordinateur embarqué et la cible temps réel sont constitués d'un ordinateur classique de bureau avec 2Go de mémoire et une capacité de stockage du disque dur de 250 Go équipé d'une carte dSpace DS1104. Nous avons opté pour ce type de solution car elle est largement répandue dans l'industrie automobile pour le prototypage rapide. Il convient de remarquer que cette solution technologique peut être remplacée par une autre technologie moins encombrante et moins coûteuse (p. ex. un microcontrôleur de type Arduino compatible avec Matlab). Tous les algorithmes de commande et de gestion des modes thermique et électrique sont programmés dans l'environnement Matlab/Simulink. Ils sont ensuite compilés et embarqués dans la cible temps réel.

3.2 Commande du moteur thermique

A l'origine, la commande du moteur thermique se faisait à l'aide d'un dispositif mécanique. Un câble permettait d'ouvrir plus ou moins le papillon d'admission d'air du moteur par une action directe sur la pédale d'accélérateur. Ce système de commande mécanique a dû être remplacé de façon à utiliser une pédale d'accélérateur électrique unique pour la commande des deux modes de motorisation présents sur le démonstrateur E². Le schéma de principe pour la commande de la motorisation thermique est présenté sur la Figure 5.

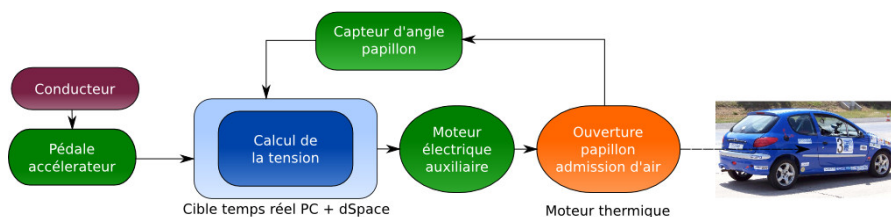


FIGURE 5 – Gestion de la motorisation thermique du démonstrateur E²

L'idée mise en œuvre pour gérer le moteur thermique consiste à remplacer l'action directe de la pédale d'accélérateur sur le câble lié au papillon par un micro-moteur électrique auxiliaire. L'ouverture du papillon est alors effectuée par l'intermédiaire de ce moteur électrique auxiliaire qui tire plus ou moins sur le câble suivant la position de la pédale d'accélérateur. Une stratégie de commande a été introduite afin de réaliser un asservissement de position du moteur électrique auxiliaire en fonction de la position de la pédale et de l'ouverture du papillon. L'algorithme de commande du moteur électrique auxiliaire est exécuté par la cible temps-réel embarquée dans le

véhicule. Elle gère ainsi l'accélération du véhicule en mode thermique. Il est intéressant de remarquer que l'agrément de conduite (conduite sportive ou douce) peut être modifié par l'intermédiaire d'un régulateur non linéaire placé entre la tension de la pédale d'accélération et la commande du moteur thermique.

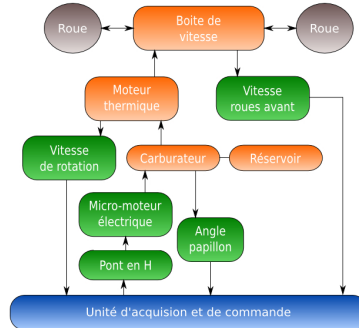


FIGURE 6 – Vue schématisée de la traction thermique du démonstrateur E²

La gestion de la motorisation thermique passe alors entièrement par la cible temps-réel comme l'illustre la Figure 6. Les algorithmes de commande demeurent toutefois complètement transparents pour le conducteur du véhicule. En effet, pour démarrer le moteur thermique il suffit d'être au point mort et d'appuyer ensuite sur la pédale d'embrayage. Le moteur thermique démarre alors automatiquement même si le véhicule n'est pas à l'arrêt. Le moteur thermique se coupe quand le conducteur actionne le bouton stop (arrêt manuel) ou quand le véhicule roule à une vitesse suffisamment basse (arrêt automatique). Cette dernière option est introduite afin d'activer automatiquement la motorisation électrique, par exemple lors d'un déplacement en zone urbaine.

3.3 Commande du moteur électrique

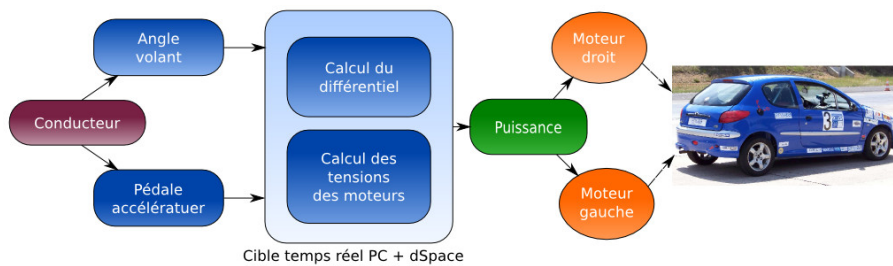


FIGURE 7 – Gestion de la motorisation électrique du démonstrateur E²

La propulsion électrique du prototype repose entièrement sur deux moteurs électriques placés au niveau des roues arrière (cf. Figure 2). Il convient de remarquer que dans la solution proposée aucune liaison mécanique entre la roue arrière droite et la roue arrière gauche n'est mise en œuvre. En effet, le différentiel entre les deux roues est réalisé de manière pilotée à partir des informations traitées par l'ordinateur embarqué. La Figure 7 illustre le schéma de principe de la stratégie de commande proposée.

Lorsque le véhicule fonctionne en mode électrique, l'ordinateur embarqué exploite les informations relatives à l'accélération et à l'angle du volant. Un algorithme de commande permet de générer le signal de tension à appliquer aux deux moteurs électriques en tenant compte de ces deux informations. Soulignons que la valeur de la tension appliquée à chaque moteur n'est pas la même.

En effet, l’algorithme de commande développé utilise la mesure de l’angle du volant de façon à obtenir une différence entre les vitesses de rotation de chaque roue arrière et génère les consignes à appliquer pour obtenir le différentiel nécessaire. La mise au point d’un tel algorithme constitue un problème très intéressant en terme d’automatique.

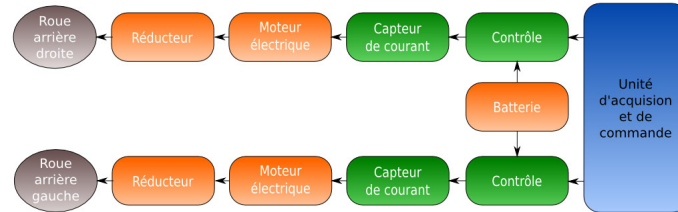


FIGURE 8 – Vue schématisée de la propulsion électrique du démonstrateur E²

La vue schématisée de l’architecture de la propulsion électrique intégrée sur le démonstrateur est représentée sur la Figure 8. La motorisation électrique est assurée par deux moteurs électriques à courant continu. Le type de moteur électrique utilisé est un LMC 200 DC Brushed dont les caractéristiques sont données par le Tableau 1. Suivant la situation de conduite, la cible temps réel délivre à chaque moteur une tension de commande différente comprise entre plus ou moins 5 volts générant ainsi un différentiel de vitesse piloté. Cette tension est alors utilisée afin de piloter les deux moteurs électriques par l’intermédiaire de deux régulateurs ALLTRAX dont les principales caractéristiques sont données par le Tableau 2.

Model	Rated current	Rated Speed	Rated Voltage	Rated Power	Rated Torque
D127	200A	3600 Rpm	72V	12.56kW	33.3Nm

TABLE 1 – Caractéristiques techniques du moteur LMC200 DC

Model	Battery Volt	Current Limit	30Sec Rating	2Min Rating	5Min Rating	1h.Rating
AXE 7245	24-72V	450A	450A	450A	350A	200A

TABLE 2 – Caractéristiques techniques du régulateur ALLTRAX

L’alimentation des moteurs électriques se fait à partir de deux séries de 6 batteries embarquées dans le coffre du véhicule. Les batteries sont de type gel/plomb (12 V - 38 Ah) et délivrent une énergie globale de 5472 W (72 V - 76 Ah). Pour des raisons évidentes de sécurité, les batteries sont logées dans un caisson isolé électriquement. Les moteurs électriques sont protégés par deux disjoncteurs dont un automatique commandé électroniquement. Un dispositif de sécurité permet de couper manuellement l’alimentation en cas d’urgence. Le schéma électrique est présenté sur la Figure 9.

Un gain en consommation électrique peut être obtenu grâce à une commande performante des deux moteurs électriques. Une modélisation mathématique simplifiée du véhicule a été effectuée afin de caractériser le comportement dynamique du véhicule et d’ainsi déterminer le couple que les moteurs électriques doivent fournir. Les principales forces qui agissent sur le véhicule sont la force de traînée aérodynamique, la force de résistance au mouvement, la force due aux frottements secs au démarrage et l’inertie de la masse à déplacer [5]. Ces forces ont ensuite été ramenées à l’arbre de chaque moteur afin de déterminer le couple. Une modélisation mathématique des moteurs électriques a été effectuée afin de réaliser la synthèse de la loi de commande bas niveau. Une première étude du comportement des moteurs en boucle ouverte a été menée de façon à identifier les améliorations susceptibles d’être apportées par la loi de commande en boucle fermée.

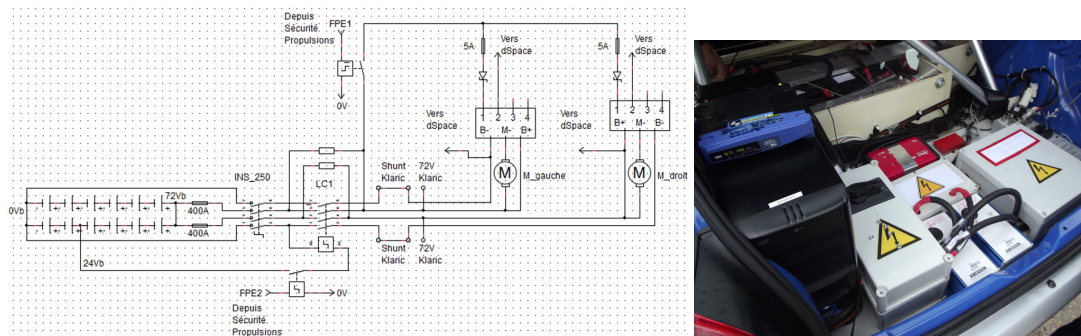


FIGURE 9 – Schéma électrique du circuit électrique (à gauche) et réalisation (à droite)

Une loi de commande a été conçue en vue d'améliorer ces performances dynamiques. Cette loi de commande, représentée sur la Figure 10, est composée de deux boucles imbriquées, la première externe en vitesse (tension d'alimentation) et la deuxième en courant (couple du moteur). Ceci permet d'avoir deux asservissements différents (en vitesse et en couple) imbriqués l'un dans l'autre [3, 4].

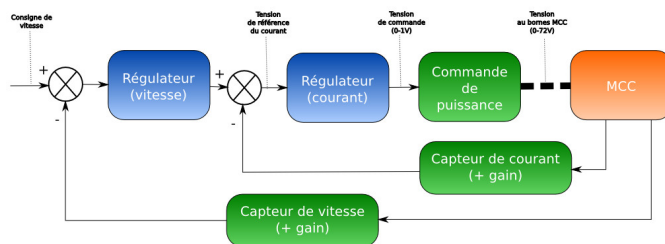


FIGURE 10 – Architecture bas niveau pour la commande des moteurs électriques [3]

Une action intégrale au niveau du bloc *régulateur de vitesse* permet de supprimer l'erreur statique (la vitesse des moteurs correspond alors à celle de la consigne). Ce correcteur entraîne cependant un dépassement de la vitesse par rapport à la consigne en régime transitoire. La deuxième boucle de régulation permet, par l'intermédiaire d'un correcteur à retard de phase (du bloc *régulateur du courant*), de limiter les oscillations du courant et de supprimer le dépassement de la vitesse. Cette stratégie de commande bas niveau permet d'obtenir une commande performante pour les deux moteurs à courant continu.

3.4 Gestion des deux modes de motorisation

Un véhicule hybride doit être en mesure d'offrir à l'utilisateur un moyen aisé de gérer les différents modes de motorisation. Il était donc nécessaire d'équiper le démonstrateur E² d'un système capable de rendre automatique le passage du mode thermique au mode électrique et inversement. L'objectif est de tirer le meilleur parti de chaque mode de manière à obtenir un meilleur rendement et par conséquent un gain de consommation de carburant fossile. Ce système doit offrir également une gestion manuelle des deux modes de motorisation. A l'heure actuelle, les motorisations électrique et thermique ne fonctionnent pas simultanément de façon optimisée. Cependant, la motorisation électrique peut apporter un couple additionnel au moteur thermique suivant la vitesse imposée par ce dernier. Pour passer du mode électrique au mode thermique, il faut être au point mort puis appuyer sur la pédale d'embrayage. Le moteur thermique démarre alors automatique-

ment même si le véhicule n'est pas à l'arrêt. Pour passer du mode thermique au mode électrique, il suffit de baisser la vitesse sous un seuil (arrêt automatique), ou de passer au point mort et appuyer sur un bouton proche du volant (arrêt manuel) lorsque la vitesse est inférieure à 30 km/h.

4 Résultats de validation

Différentes séances de tests ont permis de valider le fonctionnement des motorisations thermique et électrique gérées par la cible temps réel. Les deux modes de motorisation ont été validés en mode électrique jusqu'à 30 km/h et en mode thermique pour des vitesses supérieures. Il convient de souligner que certains tests portaient sur le démarrage du véhicule en mode 100% électrique. Le passage d'un mode à un autre a fait également l'objet d'une validation. Le comportement du différentiel électrique géré par la cible temps réel a franchi avec succès les tests imposés. Ces tests visaient également à évaluer l'autonomie des batteries dans l'optique de tirer le meilleur parti des deux modes de motorisation.

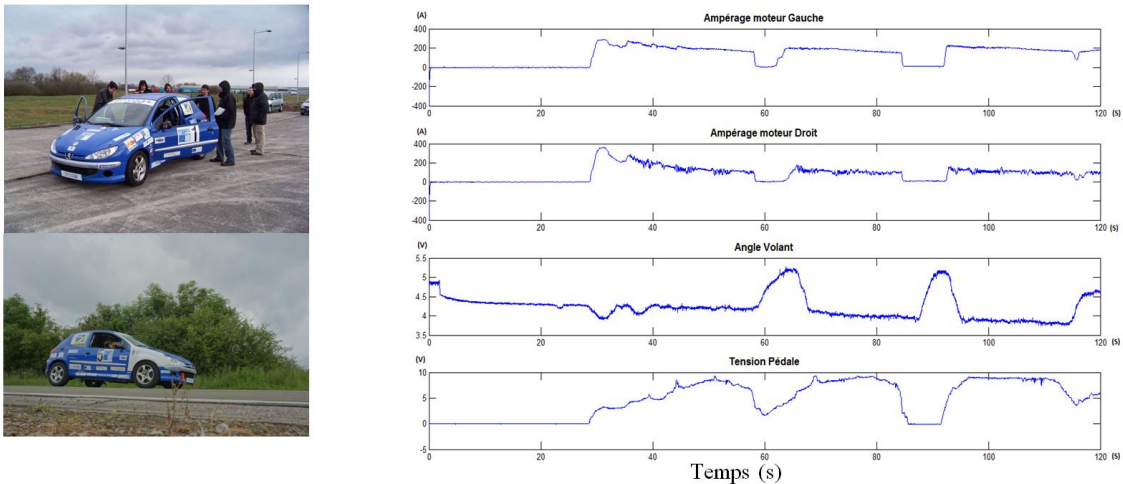


FIGURE 11 – Mesures issues d'une séance de tests du démonstrateur E²

La Figure 11 illustre un jeu de mesures issu d'un test en mode 100% électrique. Le test consistait à faire un tour de circuit comportant deux virages à gauche et deux segments droits.

La voiture est complètement à l'arrêt entre 0 et 30 secondes afin de procéder à l'étalonnage de tous les systèmes de commande. Il est à noter que dans cet intervalle de temps la tension fournie par le capteur de position de l'accélérateur est nulle (véhicule à l'arrêt) et que par conséquent les courants des deux moteurs électriques sont nuls. La tension délivrée par le capteur de l'angle du volant est constante traduisant que l'angle de braquage est nul (segment en ligne droite).

Dans l'intervalle compris entre 30s et 58s, le véhicule est soumis à une accélération progressive. Une variation (de 0 à 10v) de la tension du capteur de position de l'accélérateur est observée dans cette phase d'accélération. Les deux moteurs électriques se mettent en marche et par conséquent le courant des moteurs devient relativement important afin de vaincre les efforts résistants. Ces courants deviennent ensuite constants en régime établi (courant nominal égal à 200A).

Entre 58s et 65s, le véhicule prend un premier virage à gauche. Les variations de tension du capteur de l'angle du volant traduisent ce premier braquage à gauche. La phase de freinage nécessaire au virage entraîne une diminution de la tension du capteur d'accélérateur et des courants des moteurs. Il convient de remarquer que les courants des moteurs sont différents permettant d'obtenir ainsi un différentiel de vitesse lors du virage. Une fois le véhicule sorti du virage (à

partir de 65s), il recommence à accélérer jusqu'à atteindre une vitesse constante (segment en ligne droite). La manœuvre est ensuite répétée.

Les tests de validation effectués confirment clairement que le véhicule, la cible temps réel, les systèmes d'acquisition et de commande fonctionnent correctement, conformément aux prévisions issues des modèles de simulation mis en œuvre. L'interaction des systèmes de commande a été correctement gérée par les algorithmes embarqués sur la cible temps réel.

5 Conclusion et perspectives

Ce démonstrateur en automatique est issu de la transformation d'une Peugeot 206 à motorisation thermique en un véhicule hybride comportant deux modes de motorisation, l'un thermique et l'autre électrique. La transformation d'un véhicule grand public en véhicule hybride se heurte à un nombre important de difficultés techniques et scientifiques pouvant être surmontées à l'aide des techniques issues de l'automatique (modélisation, traitement du signal, commande, etc.). La réalisation de ce démonstrateur offre alors la possibilité d'étudier puis de valider de nombreux concepts en automatique.

Des réflexions sont actuellement menées afin d'ajouter un système de récupération d'énergie lors des phases de freinage. Il convient de remarquer que la récupération d'énergie implique un changement des deux régulateurs ALLTRAX qui ne sont pas pilotables dans les quatre quadrants ainsi que des batteries. Ce démonstrateur ouvre des perspectives très intéressantes visant par exemple une gestion optimale des deux modes de motorisation. La conception d'une stratégie de commande de gestion 100% hybride permettant d'utiliser simultanément les modes électrique et thermique est également à l'étude.

Remerciements

Un grand merci aux étudiants du club Ecarteam de l'ENSISA et à Joël Lambert, technicien du laboratoire, pour tout le travail réalisé permettant d'aboutir à ce démonstrateur.

Références

- [1] Beretta J., *Motorisation hybride thermique-électrique*, Techniques de l'ingénieur, Base documentaire : BM 2 760, 2013.
- [2] Multon B., *Motorisation des véhicules électriques*, Techniques de l'ingénieur, Base documentaire : E 3 996, 2013.
- [3] Louis J.P., Multon B., Bonnassieux Y. Lavabre M., *Régulation des MCC-Structure générale*, Techniques de l'ingénieur, Base documentaire : D 3 615, 2013.
- [4] Louis J.P., Multon B., Bonnassieux Y. Lavabre M., *Commande des machines à courant continu (mcc) à vitesse variable*, Techniques de l'ingénieur, Base documentaire : D 3 610, 2013.
- [5] Guzzella L., Sciarretta, A, *Vehicle propulsion systems*, Edition Springer-Verlag, Berlin, Germany.