



Université Lille1 Sciences et Technologies
École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité: Génie Électrique

Présentée et soutenue publiquement par

Tony LETROUVE

le 12 mars 2013

STRUCTURATION DE LA COMMANDE
DE LA SIMULATION AU PROTOTYPE
D'UN VEHICULE HYBRIDE DOUBLE PARALLELE
AU TRAVERS DE LA
REPRESENTATION ENERGETIQUE MACROSCOPIQUE

Membres du jury :

Pr. BACHA Seddik, *Rapporteur*, Université de Grenoble

Pr. BOUSCAYROL Alain, *Directeur de la thèse*, Université Lille1

Dr. DOLLINGER Nicolas, *Examineur*, PSA Peugeot Citroën

Pr. FADEL Maurice, *Examineur*, INP Toulouse

Pr LEMAIRE-SEMAIL Betty, *Examineur*, Université Lille1

Dr. LHOMME Walter, *Codirecteur de la thèse*, Université Lille1

M. ROUSSEAU Aymeric, *Invité*, Argonne National Laboratory, USA

Pr. SICARD Pierre, *Rapporteur*, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada

Dr. TRIGUI Rochdi, *Examineur*, IFSTTAR Bron

À ma merveilleuse Femme,

Remerciements

Voici l'heure des remerciements. . .

Mes premiers remerciements vont directement à mes encadrants: mon directeur de thèse, Alain Bouscayrol et à mon co-directeur de thèse Walter Lhomme, respectivement Professeur et Maître de Conférences à l'université Lille 1 Science et technologie. Alain, Walter, merci pour votre soutien scientifiques et psychologiques pendant ces trois (et même un peu plus) années de thèse. Je tenais aussi à remercier votre côté humain et pour l'amitié que nous avons liés. Je remercie aussi mon encadrant industriel, Nicolas Dollinger, Nicolas, je te remercie pour ton ouverture d'esprit qui a permis à cette thèse d'aller jusqu'au bout.

Merci à messieurs Seddik Bacha, Professeur à l'Université de Grenoble et Pierre Sicard, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse et pour leurs remarques constructives effectuées dans leurs rapports et discutées pendant la soutenance.

Merci aux examinateurs et invités de cette thèse : Maurice Fadel, Professeur à l'institut national polytechnique de Toulouse, Hyméric Rousseau, Ingénieur à Argonne National Laboratory, Rochdi Trigui, chargé de Recherche à l'IFSTTAR Bron. Merci à eux pour l'alimentation des discussions lors de la soutenance de thèse.

Merci au Professeur Francis Priou directeur du L2EP, et au Professeur Betty Lemaire-Semal, responsable de l'équipe commande du L2EP, pour m'avoir accueilli pendant toutes ces années dans le laboratoire, et l'équipe commande.

Je tiens à remercier Messieurs Vladimir Prince et Nicolas Leclercq, directeur de l'entité TASE (puis TAOE), ainsi que Mr Fabien Mercier Calvairac et Mr Cédric Nouillanz, successivement responsable de l'entité COE, pour leur accueil et pour m'avoir permis d'effectuer cette thèse dans leurs services.

La liste des personnes à remercier est très longue. Cette thèse étant un peu comme une pièce de théâtre avec tous les rebondissements que cela peut engendrer c'est pourquoi je vais remercier les acteurs de cette belle aventure qu'est la thèse dans l'ordre d'apparition : Anne-Laure, Claire, Juliana, Jun, Keyu, Nawal, Roberta, Virginie, Abdellhader, Abdelmounaim, Adél, Ali, Arnaud, Bruno, Carlos, Clément (le premier), Clément (le deuxième), Clément (le troisième), Eric, Etienne, Frédéric, Gaëtan, He, Idir, Jalal, Ke, Loïc, Ludovic (si il y a changement c'est avant !), Mathias, Matthieu, Melaine, Michel, Mircea (Alias Radu), Nadir, Olivier, Philippe, Quang, Radu (Alias Mircea), Rindra, Sajjad, Thierry, Thomas, Yvonnick, Zifu, Zuqi. Merci d'avoir donné un aspect aussi humain à cette aventure.

Merci à ma famille d'être venu à la soutenance de la thèse malgré les conditions climatiques exceptionnelles, merci Elise et merci à ceux sans qui je ne serais pas là aujourd'hui, mes parents, Diana et Dominique, merci pour votre soutien tout au long de ces années d'étude, merci de m'avoir épaulé et poussé à persévérer.

« The last but not the least », Tiphaine, ma femme depuis le 12 mai 2012, notre aventure a commencée quelques mois avant ma thèse de doctorat, mais contrairement à elle, notre aventure n'est pas prête de s'arrêter. Merci pour son soutien et pour son amour. Ce mémoire de thèse s'est dédié.



Merci...

Résumé

Les véhicules électriques hybrides sont, depuis quelques années, en émergence sur le marché automobile. Ces véhicules, alliant plusieurs technologies dont la technologie « thermique » permettent d'assurer une transition progressive vers des véhicules localement propres (véhicules électriques à batterie, véhicules électriques à pile à combustible). La complexité inhérente de ces véhicules rend plus délicate l'élaboration de leurs commandes locales et globales. De la maîtrise d'une seule source d'énergie pour le véhicule thermique, on passe à la maîtrise de plusieurs sources. La répartition optimale entre les différentes sources permettant d'assurer la traction du véhicule est un point de complexité indissociable de ces nouvelles technologies. L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode de structuration de la commande de ces véhicules complexes. Elle sera réalisée grâce à la REM (Représentation Energétique Macroscopique), formalisme de représentation fonctionnelle qui permettra d'uniformiser les différentes étapes du développement de la commande, de la simulation jusqu'à la validation sur prototype. De plus, des étapes intermédiaires d'émulation (Hardware-In-the-Loop simulation) seront formalisées avec la REM pour les validations partielles de sous-systèmes et de leurs commandes.

Mots clefs : Représentation Energétique Macroscopique, Hardware-In-the-Loop simulation, véhicules électriques hybrides, structure de commande systématique, gestion de l'énergie.

In the automotive field, the progresses achieved these last years have allowed to improve considerably the efficiency of the car introducing new vehicles into the market share. Nowadays, research on Hybrid Electric Vehicles (HEV) is one of the most promising solutions to reduce emissions and consumption. Nevertheless, this kind of vehicle requires a complex control due to the various multi-physical subsystems. The strong interactions between the different components of the vehicle require studying them in a global and systemic way. It is therefore needed to develop novel approaches. The goal of this Ph.D thesis is to develop a method to organize the control scheme of these complex vehicles. EMR (Energetic Macroscopic Representation), graphical formalism for energetic system, is used as unified description in that aim. The deduced control is thus implemented from the simulation to the validation on the prototype vehicle. Moreover, HIL simulations (Hardware-In-the-Loop simulations) are introduced as intermediary steps, in order to validate subsystems and their control. HIL simulations are also organized using EMR.

Keywords: Energetic Macroscopic Representation, Hardware-In-the-Loop simulation, Hybrid Electric Vehicle, systematic control structure, energy management.

Introduction	1
Chapitre 1 :	
Développement de véhicules électrifiés	5
I.1. Véhicules propres et enjeux.....	6
I.1.a. Enjeux sociétaux et économiques	6
I.1.b. Solutions envisagées.....	8
I.1.c. Electrification des véhicules	10
I.2. De la simulation au prototype.....	15
I.2.a. Définitions générales	15
I.2.b. Démarche classique structurelle	18
I.2.c. Démarche fonctionnelle.....	20
I.3. Cahier des charges de la thèse	22
I.3.a. Positionnement scientifique.....	22
I.3.b. Véhicule étudié : Peugeot 3008 HYbrid4.....	24
I.3.c. Organisation des travaux	26
I.4. Conclusion	28
Chapitre 2 :	
Commande d'un véhicule HYbrid4 par inversion de sa représentation structurelle	29
II.1. Différentes approches de la structuration de la commande.....	30
II.1.a. Utilisation d'une représentation structurelle	30
II.1.b. Utilisation d'une représentation fonctionnelle	30
II.1.c. Intérêt du couplage des représentations.....	31
II.2. Représentations structurelle et fonctionnelle du véhicule étudié	35
II.2.a. Représentation structurelle : RepVHP	35
II.2.b. Représentation fonctionnelle : REM.....	40
II.3. Elaboration de la commande par inversion	51
II.3.a. Commande basée sur l'inversion de la REM	51
II.3.b. Stratégie de gestion de l'énergie	58
II.4. Simulation mixte dans un logiciel fonctionnel.....	63
II.4.a. Interface de couplage.....	63
II.4.b. Résultats de simulation	65
II.5. Conclusion.....	69

Chapitre 3 :

Emulation temps réel d'un véhicule hybride type HYbrid4.....	71
III.1. Généralités sur l'émulation temps réel	72
III.1.a. Principes de l'émulation temps réel	72
III.1.b. Différentes échelles d'émulation	76
III.1.c. Démarche proposée	78
III.2. Emulation à échelle réduite.....	79
III.2.a. Réalisation de la « simulation HIL »	79
III.2.b. Résultats d'expérimentation	92
III.3. Emulation à pleine échelle	96
III.3.a. Réalisation de la « simulation HIL »	96
III.3.b. Résultats d'expérimentation	98
III.4. Conclusion	101

Chapitre 4 :

Validation sur prototype et discussions	103
IV.1. Véhicule prototype.....	104
IV.1.a. Architecture de commande	104
IV.1.b. Architecture de puissance	109
IV.2. Expérimentation sur véhicule prototype	111
IV.2.a. Couplage SMC – Commande prototype	111
IV.2.b. Résultats d'expérimentation	118
IV.3. Intérêt des différentes étapes	122
IV.3.a. Comparaison des résultats	122
IV.3.b. Discussion sur les différentes étapes	127
IV.1. Conclusion	133

Conclusion générale	135
----------------------------------	-----

Annexe

Annexe A : Eléments constitutifs du BondGraph.....	139
Annexe B : Modélisation utilisée dans SimVHP (PSA Peugeot Citroën).....	141
Annexe C : Initiation à la Représentation Energétique Macroscopique	143
Annexe D : Règles d'inversion de la REM.....	149
Annexe E : Plateforme d'expérimentation eV (L2EP)	151

Abréviations	155
---------------------------	-----

Bibliographie	157
----------------------------	-----

Il nous faut aujourd'hui penser à la modification de notre activité, et ce, pour principalement deux raisons. La première est que l'activité humaine actuelle est principalement basée sur la combustion d'hydrocarbures fossiles. La diminution des réserves d'hydrocarbure de notre planète nous oblige aujourd'hui à modifier notre façon de consommer. Avoir une économie basée sur la consommation d'hydrocarbure nous rend également dépendants des pays producteurs. Les différentes crises mondiales influent donc sur l'économie de chaque pays. La deuxième raison est que l'activité humaine génère de manière excessive des gaz qui accentuent le dérèglement climatique de notre planète et ses conséquences. Les polluants émis par l'Homme, principalement le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane et différents oxydes d'azote, ont, depuis la révolution industrielle, une évolution exponentielle. Le domaine des transports, et plus particulièrement le transport terrestre, consomme une grande partie des réserves mondiales de pétrole et émet des émissions de CO₂ non négligeables. Le transport terrestre contribue à 32% à ces émissions [Ministère 2010], ce qui demande à être réduit.

Beaucoup de solutions sont envisagées pour diminuer l'impact des transports sur l'environnement tel que les transports électriques en commun (train, métro, etc.), l'autopartage ou encore le covoiturage. Les constructeurs automobiles réduisent, quant à eux, la consommation de leurs voitures neuves (diminution moyenne de 0,1 l/an [UTP 2010]). Mais cette diminution constante aura une limite et le parc automobile mondial vieillit. Les voitures 100% propres ne sont pas encore très répandues (voiture électrique à batterie, voiture électrique à pile à combustible [Chan 2009]). Il faudra, auparavant, utiliser une passerelle entre les voitures purement thermiques (essence ou diesel) et ces voitures propres. Cette passerelle correspond aux voitures hybrides, lesquelles associent deux sources d'énergie différentes pour se mouvoir [Ehsani 2005] [Gao 2005] [Chan 2007]. L'hybridation la plus courante, dans le domaine automobile, combine un moteur à combustion interne (thermique) et une chaîne de traction électrique alimentée par une batterie. Depuis plusieurs années, le développement de cette nouvelle technologie a suscité l'intérêt de la plupart des constructeurs automobiles : Toyota, Honda, BMW, Ford... Après l'arrivée des premières voitures hybrides sur le marché (Toyota Prius, 1997 par exemple), PSA Peugeot Citroën a lancé une campagne de voitures hybrides. Depuis, Peugeot et Citroën vendent la motorisation e-HDI (Stop & Start). Mais aujourd'hui, PSA Peugeot Citroën commercialise le premier véhicule électrique

hybride diesel au monde : HYbrid4 [Peugeot 2012]. Le passage d'un véhicule mono-source (thermique), à un véhicule multi-source force les constructeurs automobiles à repenser leurs façons de les concevoir. Au vu de l'augmentation de la complexité inhérente à l'utilisation des véhicules de plus en plus complexes, il est donc important de définir de nouvelles règles pour l'élaboration de la commande de ces nouveaux véhicules. Aujourd'hui, la majorité des constructeurs automobiles utilisent des logiciels de simulation à priorité structurelle. Ces logiciels permettent de réaliser rapidement une simulation pour valider le pré-dimensionnement des différents organes, ainsi que pour analyser les différents flux énergétiques du véhicule. Cependant, il est difficile de fournir une structure de commande en utilisant ce type de logiciel. De ce fait, la commande élaborée est effectuée de manière heuristique et provient de l'expertise sur le véhicule et de diverses simulations. De plus, l'approche, utilisée aujourd'hui par les industriels, correspond souvent à un passage direct de la simulation au prototype. Cependant, la complexité de la gestion d'énergie de ces véhicules contraint le développeur de la commande à effectuer des allers-retours entre la simulation et le prototype. Ces allers-retours permettent la mise au point de la commande finale implantable dans le véhicule prototype, mais ils demandent beaucoup de temps lors de la phase de conception. Dans le cadre de cette problématique, le réseau national sur les véhicules hybrides MEGEVH (Modélisation Energétique et Gestion d'Energie des Véhicules Hybrides) [MEGEVH 2007] utilise une méthode de travail plus fonctionnelle basée sur la REM (Représentation Energétique Macroscopique) [Bouscayrol 2003]. L'utilisation de cette méthode de travail nécessite un temps supplémentaire lors de la phase de représentation du système étudié. Elle permet toutefois de fournir une structure de commande systématique, laquelle permet de réduire le nombre d'aller-retour entre la simulation et l'application sur prototype.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode systématique d'organisation de la commande de véhicules hybrides. Elle sera basée sur la REM comme formalisme unifiant dans les différentes étapes. Après l'étape de modélisation, une phase de représentation (organisation du modèle) est introduite à cette fin. La REM permettra la déduction systématique d'une structure de commande et mettra en avant les leviers pour la gestion de l'énergie. Cette commande sera utilisée de la simulation à la validation sur prototype. On introduira et formalisera, de plus, des étapes d'émulations (simulations HIL) pour valider progressivement les sous-systèmes et leurs commandes avant le passage sur le véhicule prototype. Pour ce faire ces travaux ont bénéficié des développements antérieurs du réseau MEGEVH, en particulier des thèses des doctorants du réseau. Ce doctorat a aussi pour

objectif de contribuer à la capitalisation et à l'extension des connaissances du réseau au travers d'une application innovante, même s'il est centré sur un véhicule de PSA Peugeot Citroën.

Le premier chapitre de cette thèse se compose de deux parties. La première partie montre les enjeux sociétaux et économiques qui contraignent les constructeurs automobiles à développer de nouveaux véhicules moins énergivores. La deuxième partie de ce chapitre explique les différences entre l'approche industrielle, aujourd'hui utilisée chez PSA Peugeot Citroën, et l'approche élaborée pendant cette thèse.

Le deuxième chapitre a pour objectif de tester la première modification de l'approche élaborée de cette thèse : l'utilisation de la REM. L'utilisation d'une représentation fonctionnelle, respectant la causalité physique, telle que la REM, est un pas en avant vers la systématisation de la commande. En effet, la REM permet, en utilisant des règles d'inversion, de définir une structure de commande locale systématique. La commande globale (stratégie de gestion de l'énergie) restera effectuée de manière heuristique. La validation de cette commande sera effectuée dans le logiciel de simulation à priorité structurelle de PSA Peugeot Citroën : SimVHP.

La deuxième modification de la démarche de l'élaboration effectuée par PSA Peugeot Citroën passe par l'ajout d'étapes intermédiaires entre la simulation et le prototype. Ces étapes permettent de valider partiellement la commande élaborée. Elles se nomment « Hardware-In-the-Loop (HIL) simulations ». Une « simulation HIL » consiste dans l'incorporation d'une partie physique dans une boucle de simulation. Cette simulation est réalisée en temps réel et permet donc de valider la portabilité temps réel de la commande réalisée en simulation. Ces étapes seront discutées dans le troisième chapitre de ce mémoire.

Dans le quatrième chapitre, l'implémentation de la commande dans un véhicule prototype de PSA Peugeot Citroën sera effectuée. Le véhicule prototype mis à disposition est une 308 disposant de l'architecture HYbrid4. Cette expérimentation permettra de valider la portabilité de la commande de la simulation jusqu'au prototype sans modification de la structure de la commande. L'expérimentation réalisée sur le véhicule sera ensuite reproduite en simulation et en « simulation HIL ». La comparaison des résultats permettra ensuite de définir le degré de précision des différentes étapes. Enfin, suite à la comparaison des résultats, une discussion sera ouverte concernant l'intérêt de chaque étape.

Chapitre 1 : Développement de véhicules électrifiés

Résumé du chapitre 1

L'objectif de ce chapitre est de définir le cahier des charges de la thèse au travers des enjeux du développement des véhicules électrifiés

Le contexte de la mise en place de moyens de transport moins énergivores et plus optimisés sera tout d'abord présenté. La deuxième partie de ce chapitre portera sur les démarches de l'élaboration de la commande d'un véhicule de la simulation au prototype. Après un rappel des définitions importantes permettant la bonne compréhension de ces travaux de thèse, la démarche classique industrielle sera mise en comparaison avec une démarche plus structurée. La dernière partie présentera le positionnement scientifique de cette thèse par rapport aux différents travaux effectués sur ce thème.

Plan du chapitre 1

I.1. Véhicules propres et enjeux.....	6
I.1.a. Enjeux sociétaux et économiques.....	6
I.1.b. Solutions envisagées.....	8
I.1.c. Electrification des véhicules.....	10
I.2. De la simulation au prototype.....	15
I.2.a. Définitions générales.....	15
I.2.b. Démarche classique structurelle.....	18
I.2.c. Démarche fonctionnelle.....	20
I.3. Cahier des charges de la thèse.....	22
I.3.a. Positionnement scientifique.....	22
I.3.b. Véhicule étudié : Peugeot 3008 HYbrid4.....	24
I.3.c. Organisation des travaux.....	26
I.4. Conclusion.....	28

I.1. Véhicules propres et enjeux

I.1.a. Enjeux sociétaux et économiques

Enjeux sociétaux

L'activité humaine a fortement évolué depuis plusieurs années. Au départ liée à la nature, son fonctionnement et son économie en dépendaient. Elle peut aujourd'hui se passer des évolutions naturelles et définir elle-même les tenants de son économie. Ces activités, contre nature, ont introduit des problèmes environnementaux tels que : réchauffement climatique, trou de la couche d'ozone, fonte de glace qui engendre des montées du niveau de la mer, etc.

Les principales causes de ces problèmes sont liées aux Gaz à Effet de Serre (GES). En effet, l'augmentation rapide de ces gaz, gaz sans lesquels la vie sur terre serait impossible, engendre les problèmes énoncés précédemment. Les principaux GES présents dans l'atmosphère sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, etc. Il est à noter que le CO₂ est l'un des principaux GES provenant de l'activité humaine.

Les différentes activités humaines peuvent être séparées en plusieurs secteurs d'activités : le transport, l'industrie, l'agriculture, l'habitat et le tertiaire. Chacune de ces activités engendre du CO₂ renforçant les problèmes environnementaux. Le domaine des transports y est responsable pour plus de 32% en France, en 2007 (Figure 1). Le transport routier et le secteur résidentiel sont les deux seuls secteurs qui ont vu leurs émissions de CO₂ augmenter entre 1990 et 2007 (+4%). 55% de ces émissions liées au transport proviennent du transport de personnes. La voiture est l'un des plus polluants en termes d'émission de CO₂ par passager par km (Figure 2).

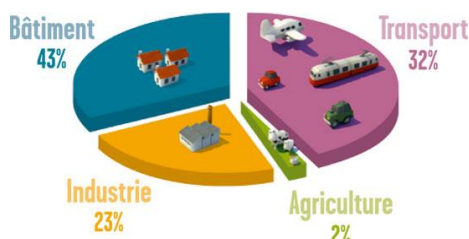


Figure 1 Emission de CO₂ par secteur d'activité en 2007 en France [Ministère 2010]

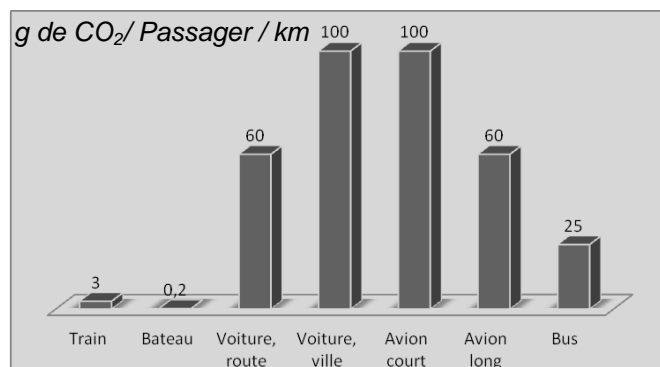


Figure 2 Emission de différents moyens de transport de personnes [ADEME 2007]

Enjeux économiques

Dans le paragraphe précédent il a été mis en évidence que le transport de personnes contribue fortement au dérèglement climatique. Mis à part l'aspect environnemental, qui reste un point d'intérêt encore considéré secondaire, l'aspect économique qui touche directement les particuliers est beaucoup plus incitatif à un changement.

Des politiques incitatives ont été mises en place. Par exemple, le système de bonus / malus écologique, instauré par plusieurs pays (France, Belgique etc.), favorise l'achat de voitures plus respectueuses de l'environnement. Le gouvernement français estime que le bonus / malus permettra de « réduire le prix d'achat des véhicules écologiques, responsabiliser le consommateur, accélérer le renouvellement durable du parc automobile et stimuler l'innovation technologique des constructeurs en les encourageant à cibler leurs offres sur les produits les plus « propres ». Cette mesure, qui a coûté 500 millions d'euros à l'Etat français, a aussi permis de diminuer les émissions moyennes des automobiles particulières neuves de 155gCO₂/km à 134gCO₂/km en 6 ans (Figure 3) [ADEME 2012].

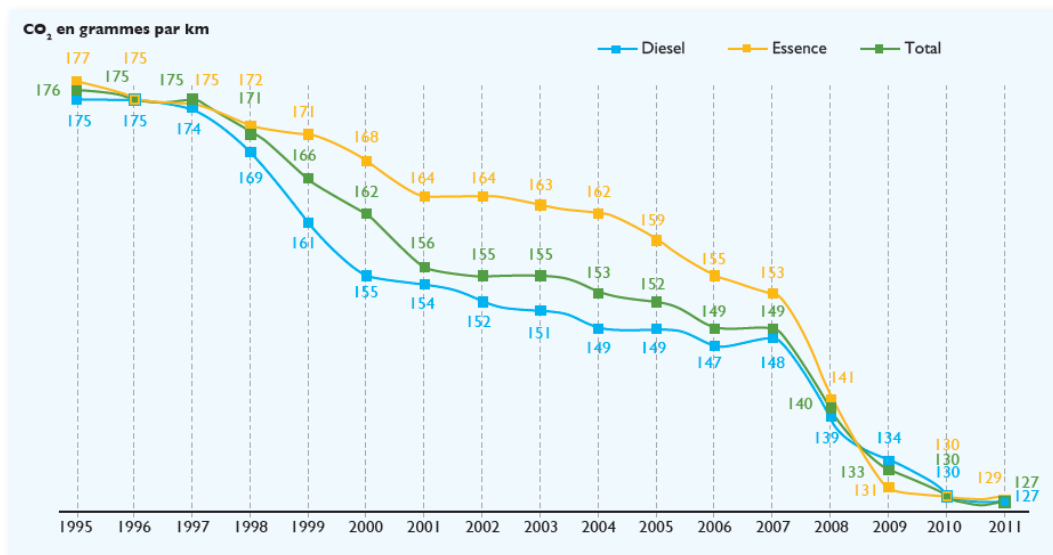


Figure 3 Emissions moyennes des véhicules particuliers neufs depuis 2003[ADEME 2012]

Un autre point très important est la baisse des réserves de pétrole. La consommation mondiale de pétrole ne fait qu'augmenter et les réserves de pétrole découvertes ne parviennent plus à compenser cette surconsommation. Cela engendre un affaiblissement des réserves qui fait du pétrole une ressource rare et donc chère (Figure 4). Il est à noter que le secteur d'activité consommant le plus de pétrole dépend fortement du pays où est effectuée l'étude. Selon une étude de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) de 2004 le secteur des transports consommait déjà 50% des réserves mondiales de pétrole. Il est donc important d'apporter de nouvelles solutions technologiques pour diminuer cette consommation.

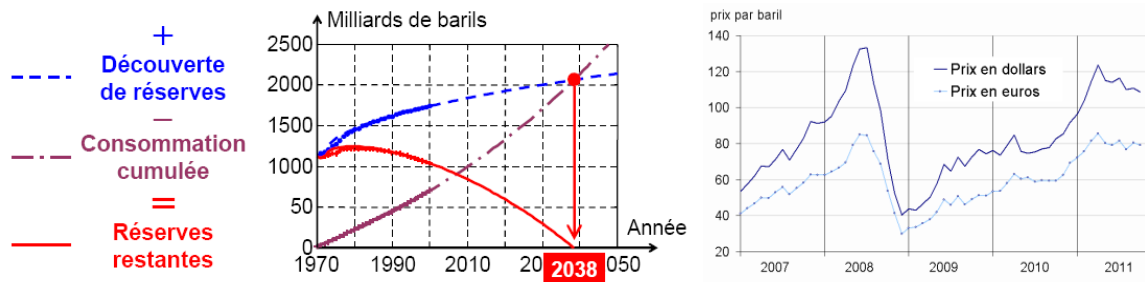


Figure 4 Réserve de pétrole restante [Ehsani 2005] et prix du baril (159L) de pétrole [Prixdubaril 2011]

I.1.b. Solutions envisagées

Solutions collectives

Différentes solutions sont aujourd'hui possibles pour diminuer l'impact environnemental du transport de manière collective. Ces solutions ne seront pas sans effet sur la manière de vivre et sur la manière de penser « transport ».

L'augmentation de la fréquentation des transports en commun [UTP 2010] (Figure 5) : train, métro, etc. reste une solution rentable économiquement et écologiquement. Cette solution reste la plus utilisée pour les trajets domicile-travail.

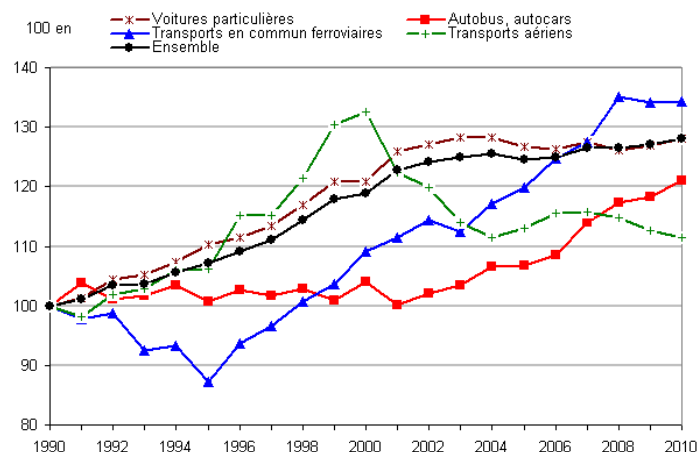


Figure 5 Transport intérieur de voyageurs par mode [UTP 2010]

Les transports collectifs sont d'ailleurs une des priorités du Grenelle de l'Environnement. Dans ce cadre, l'Etat s'est engagé à multiplier par 5 le kilométrage des réseaux de transport collectif en site propre (de 329 km à 1800 km), construire 424 km de nouvelles lignes de transports collectifs (hors Ile-de-France) dont 205 km de tramway [Grenelle 2010]. Par exemple, à Mulhouse (Figure 6), 3 stations supplémentaires du tramway ont été ouvertes en juillet 2009. L'utilisation des transports en commun à Mulhouse en 2009 était de 20 % supérieure à celle de 2005 avec une part grandissante du tramway (54 % des voyages en 2009, soit 13 millions). On note également une augmentation de 71% du nombre d'abonnés en 2009. 62 % des déplacements sont des trajets domicile-travail ou domicile-études.



Figure 6 Exemple du tramway de Mulhouse [Grenelle 2010]

Le covoiturage est une solution de plus en plus encouragée sur les parcours de plus longue distance. Une multitude de sites internet ont vu le jour ces dernières années pour rallier les personnes voulant se rendre au même endroit (exemple : www.covoiturage.fr). Certaines entreprises ont même pris l'initiative de mettre en place un service permettant le covoiturage entre leurs collaborateurs. Une autre solution qui permet le partage d'un véhicule dans les grandes villes : l'autopartage. Une voiture particulière est utilisée en moyenne 10% du temps de sa durée de vie [Lilas 2012]. L'autopartage se base sur ce fait pour rentabiliser les véhicules, plus particulièrement leurs temps d'utilisation, et pour réduire leurs nombres dans les villes. Ces initiatives ont été mises en place dans différentes agglomérations françaises : Lilas à Lille, Auto Bleue à Nice et Autolib à Paris. La mise en place de bornes de partage de vélos telle que, Vélib' à Paris [Vélib 2011], V'Lille, etc. permet aux habitants des zones urbanisées de prendre un vélo à une borne et le laisser à une autre borne. L'utilisateur est ainsi libre de ses horaires et est indépendant des transports en commun conventionnels.

Solutions individuelles

Certaines solutions restent aujourd'hui possibles pour bénéficier d'un transport individuel tout en diminuant l'impact écologique de nos déplacements.

Les avancées technologiques, telles que l'amélioration des rendements des moteurs thermiques, la diminution de la masse du véhicule, l'utilisation de biocarburant [Harris 2009], l'éco-conception, l'assistance à l'éco conduite, etc., permettent aujourd'hui de réduire la consommation des véhicules neufs. Cependant, cette diminution aura un jour une limite et l'avenir du transport individuel dépendra de nouvelles avancées technologiques autres que celles liées au véhicule thermique.

Plusieurs motorisations « propres » sont aujourd'hui disponibles ou en phase de développement telles que les véhicules électriques, les véhicules électriques à pile à combustible, etc. Il existe actuellement autant de concepts qu'il existe de sources d'énergie. On peut citer : l'essence, le diesel, l'hydrogène, l'air comprimée, l'électricité, le gaz naturel, l'énergie solaire, etc. Tous ces vecteurs d'énergie ont une technologie plus ou moins mature et un facteur d'intégrabilité dans un véhicule plus ou moins bon. Pour allier les avantages de

plusieurs sources d'énergie, les véhicules multi-sources ont été et sont toujours étudiés. On les appelle véhicules hybrides.

Un véhicule hybride est un véhicule combinant plusieurs sources d'énergie distinctes. Ces dernières contribuent à la propulsion de manière directe ou indirecte. L'appellation véhicule hybride date de 1900 (premier véhicule hybride : La Porsche Lohner en 1900 [Heinzmann 2010]). Si l'on prend cette définition mot pour mot, un véhicule thermique disposant du système stop & start n'est pas considéré comme un véhicule hybride. De plus, la limite entre un véhicule hybride et un véhicule disposant de plusieurs sources d'énergie, mais de même nature, n'est pas clairement définie. En effet, un véhicule disposant d'une batterie et d'une pile à combustible ne peut être considéré comme un véhicule hybride [Tritschler 2010]. C'est un véhicule électrique disposant de plusieurs sources d'énergie. Il existe donc autant de types de véhicules hybrides que de combinaisons de sources d'énergie (sources citées précédemment). Par exemple, le vélo à assistance électrique [Prenier 2004] pourrait être considéré comme un véhicule hybride qui aurait pour sources d'énergie la force humaine et l'électricité. Dans l'application automobile, les combinaisons de sources d'énergie les plus courantes sont :

- thermique et hydraulique, appelé VHH (Véhicule Hydraulique Hybride) (Figure 7 a) [Kepner 2002],
- hydrogène et électrique : première appellation en 1959 [Wand 2006] (Figure 7 b),
- thermique et électrique appelé VEH (Véhicule Electrique Hybride) [Chan 2002].

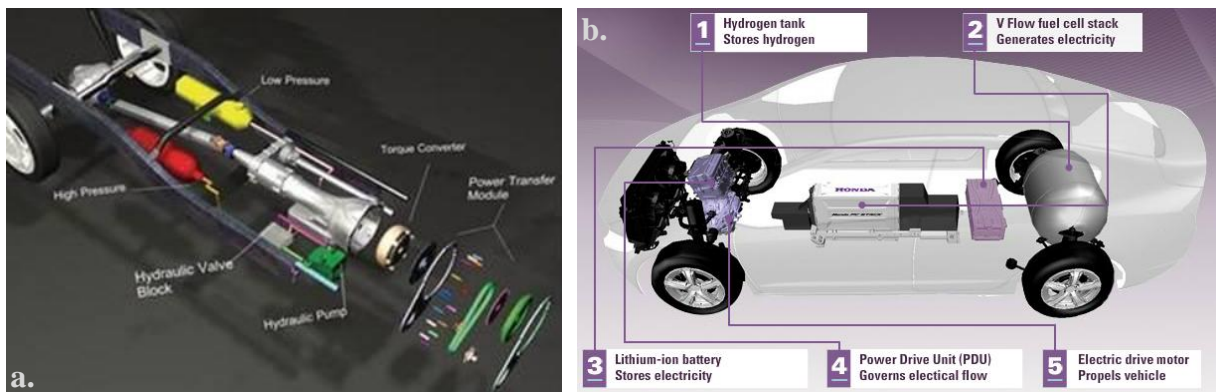


Figure 7 Architecture d'un VHH (a) et Architecture de la Honda FCX clarity [Honda 2012] (b)

I.1.c. Electrification des véhicules

Le Véhicule Electrique Hybride (VEH) est aujourd'hui le véhicule hybride le plus présent sur le marché. Ce véhicule se caractérise par son taux d'hybridation (micro, mild et full hybrid) et par son architecture (série, parallèle et mixte)

Taux d'hybridation d'un véhicule électrique hybride

Dans le cas d'un véhicule hybride électrique, il existe différents taux d'hybridation (et de fonctionnalités sous-jacentes). Ce taux d'hybridation correspond au ratio entre la puissance électrique et la puissance mécanique du moteur thermique :

Le « micro hybrid » - Le principe du « micro hybrid » est de remplacer le démarreur conventionnel (machine à courant continu dans la plupart des cas) et l'alternateur (machine synchrone) par un alternodémarrreur (machine synchrone). Ce dernier permet d'éteindre le moteur thermique quand le véhicule est à l'arrêt et sous certaines conditions (température, état de charge de la batterie etc.) [Chau 2007]. Ce niveau d'hybridation permet d'avoir des gains de carburant de 2 à 10 % en fonction de la densité du trafic et si le parcours est effectué dans une zone urbaine. Le rapport de puissance entre la machine électrique et le moteur thermique est faible.

Le « mild hybrid » - Le « mild hybrid » est un niveau d'hybridation légèrement supérieur. Il reprend la fonction du « micro hybrid » et ajoute deux nouvelles fonctionnalités : récupérer l'énergie d'une décélération et fournir un appoint de puissance pour aider dans les phases de reprise (boost) [Chan 2007]. Il est alors nécessaire d'augmenter la puissance électrique pour assurer ces fonctions. Ce niveau d'hybridation permet d'avoir des gains de carburant entre 10 et 20 % selon le cycle.

Le « full hybrid » - Le « full hybrid » reprend le même principe que le « mild hybrid » mais les machines électriques sont encore plus puissantes. De ce fait, il est donc possible de propulser (ou tracter) le véhicule en utilisant seulement la machine électrique (mode tout électrique). Cela assure un certain confort de conduite en zone urbaine [Chan 2007]. Ce niveau d'hybridation permet d'avoir des gains de carburant entre 30 et 50 % [Chan 2009]. Le « plug-in full hybrid » est une fonction supplémentaire du full hybrid : dans le cas d'un full hybrid le véhicule peut fonctionner en tout électrique sur quelques kilomètres. Le plug-in hybrid, embarquant une plus grande batterie pouvant être branchée sur le secteur, permet de parcourir une distance en cycle urbain comparable aux distances faites par les usagers lors de leurs trajets domicile travail. Le projet HYdole (Hybride à DOminante éLEctrique) [PREDIT 2011] (Figure 8) de PSA Peugeot Citroën en partenariat avec le CEA, EDF, Freescale, l'IFP et Leroy somer est une mise en œuvre de ce type d'hybridation.



Figure 8 Utilisation de la batterie dans le projet HYdole [PREDIT 2011]

Architecture d'un véhicule électrique hybride

Plusieurs architectures seront expliquées dans ce paragraphe mais cette liste n'est pas exhaustive. En effet, des architectures particulières ou tout simplement des combinaisons d'architectures « conventionnelles » peuvent être réalisées.

L'architecture série - Il s'agit de mettre en cascade le moteur thermique et le moteur électrique avec les convertisseurs d'énergie associés (Figure 9). L'alternateur transforme l'énergie mécanique en courant électrique débitant sur une batterie. Ensuite, le moteur électrique de propulsion retransforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Un véhicule illustrant cette architecture est la Chevrolet Volt (Figure 9).

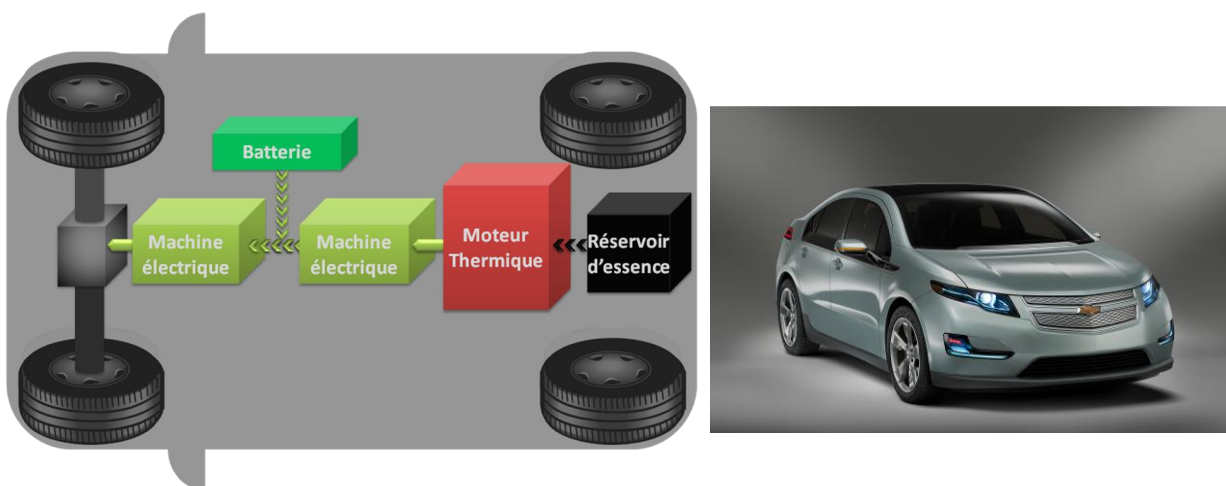


Figure 9 Schéma d'une architecture série et la Chevrolet Volt [Voelcker 2011]

Les deux moteurs n'étant pas mécaniquement liés, on peut les disposer comme on le souhaite dans le système à propulser. Cette structure présente néanmoins deux inconvénients : la mise en cascade des différents éléments induit un faible rendement global et le moteur électrique doit être dimensionné pour fournir la pleine puissance de propulsion du véhicule.

L'architecture parallèle - Il existe plusieurs architectures de véhicule hybride parallèle. La structure la plus élémentaire (Figure 10) est appelée "architecture parallèle à addition de

couple". Le couple résultant aux roues est la somme des couples fournis par le moteur thermique et électrique. Le couplage entre le moteur thermique et la machine électrique peut, soit se faire avec une transmission disposant d'une courroie pour relier les deux motorisations (architecture double arbre), soit sur un même arbre (simple arbre).

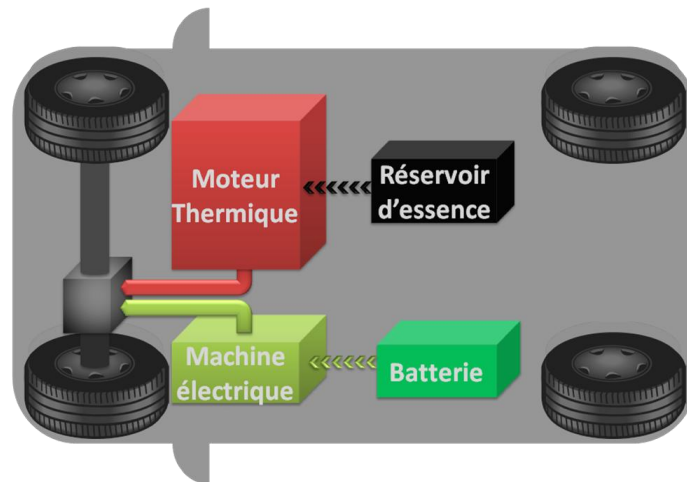


Figure 10 Schéma d'une première architecture parallèle

L'architecture double parallèle - Cette architecture particulière, étudiée dans le cadre de cette thèse, est en fait le couplage de deux structures parallèles (Figure 11). Cette architecture n'est pas ancienne et commence à être étudiée par plusieurs constructeurs automobiles (PSA Peugeot Citroën [Peugeot 2012] [Letrouvé 2009a] [Letrouvé 2009b], Land Rover [Lhomme 2008]). Selon les versions développées par les industriels, un axe central peut connecter ou non les axes avant et arrière. Par exemple, le concept ERAD (Figure 11) dispose d'un organe de découplage permettant de découpler l'axe avant de l'axe arrière [Lhomme 2008]. Les différentes études menées jusqu'alors sont beaucoup plus basées sur la stabilité du véhicule [Kim 2005] [Kim 2008] [Naderi 2008] que sur sa modélisation et sa commande [Song 2005].

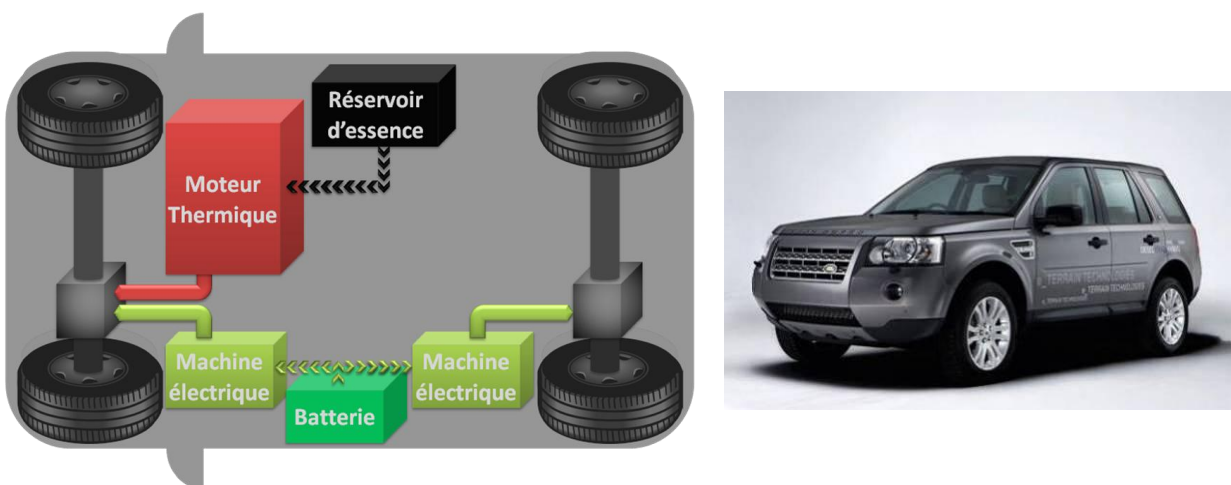


Figure 11 Schéma d'une architecture double parallèle et le concept ERAD de Land Rover

L'architecture série-parallèle – Un véhicule hybride série-parallèle dispose d'un répartiteur de puissance. Le véhicule le plus connu disposant de cette architecture est la

Toyota Prius. Ce véhicule utilise un train planétaire [Ehsani 2007]. Un train planétaire est composé d'un porte-satellites, d'un planétaire et d'une couronne. Dans cette architecture, deux machines électriques sont présentes et connectées au planétaire et à la couronne. Le moteur thermique est, quant à lui, connecté au porte-satellites. La machine électrique 2 (Figure 12) permet de réaliser une addition de couple, comme le réaliserait une machine électrique dans le cadre de l'architecture parallèle simple arbre : la machine est connectée sur l'arbre de transmission entre la couronne du train planétaire et la transmission mécanique amenant au différentiel.

D'autres véhicules hybrides série-parallèle sont à l'étude comme ceux utilisant un double train planétaire [Syed 2012] ou ceux utilisant un EVT (Electric Variable Transmission) [Cheng 2011].

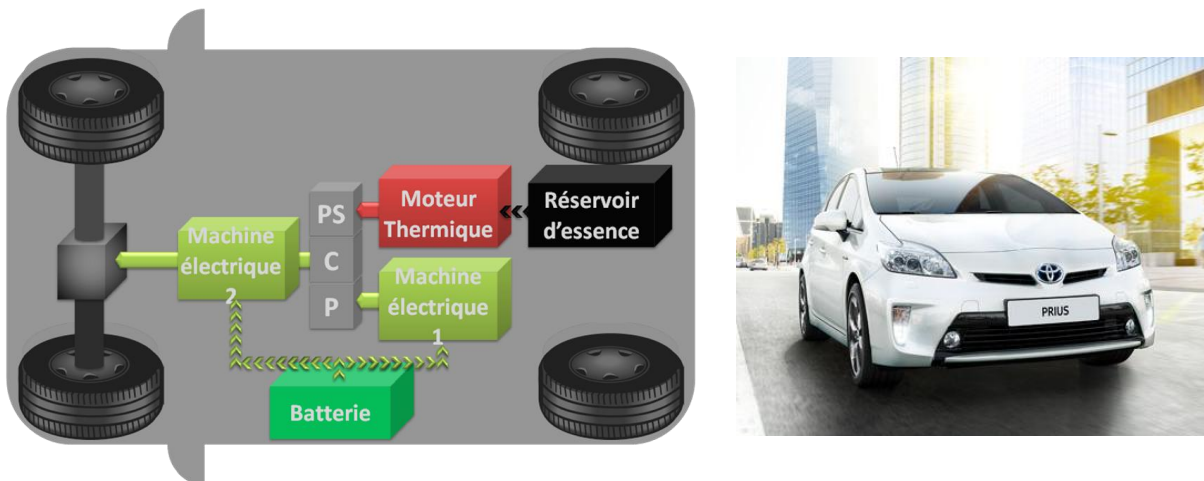


Figure 12 Schéma d'une architecture série-parallèle et véhicule Toyota Prius

I.2. De la simulation au prototype

I.2.a. Définitions générales

Dans cette partie, les définitions de certains concepts nécessaires à la compréhension de ce mémoire seront établies. La Figure 13 montre le cheminement utilisé pour passer d'un système réel à sa simulation. Les différentes appellations de cette figure seront expliquées et les différents outils de simulation disponibles seront introduits.

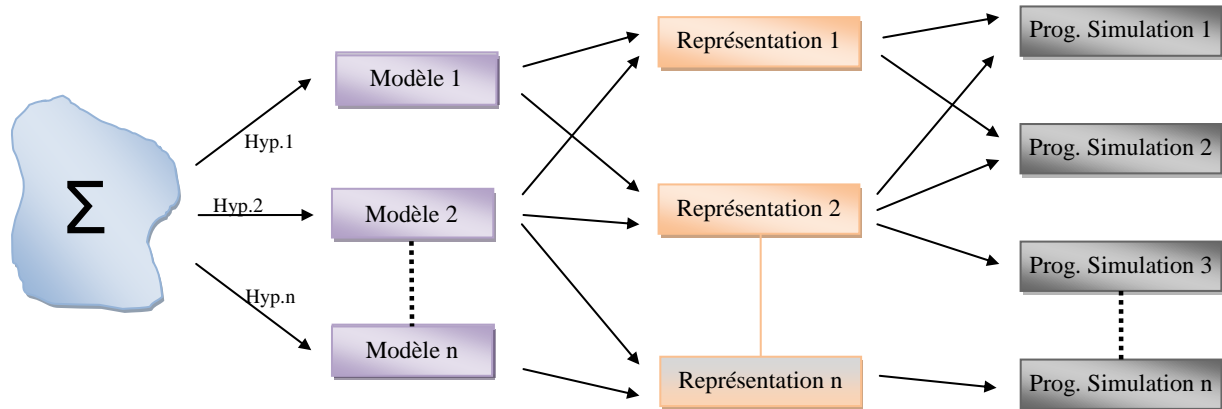


Figure 13 Cheminement général du système réel aux programmes de simulation

Modèle

Un modèle est une description (qui peut être mathématique) du comportement du système défini selon des hypothèses associées à un objectif. La plage de validité est donc définie par les hypothèses. Un système dispose de plusieurs modèles selon les hypothèses définies (ex : modèle statique / dynamique, etc.).

On peut placer ces modèles en deux catégories : les modèles fonctionnels, les modèles structurels [Chan 2010].

Contrairement à une modélisation structurelle, une modélisation fonctionnelle se base sur une association de fonctions. L'objectif principal de ce type de modélisation est l'analyse fonctionnelle mais surtout de pouvoir fixer des règles pour l'établissement de la commande du système étudié.

Représentation

Une représentation est une organisation d'un modèle pour mettre en évidence certaines propriétés du système. Il est à noter qu'il n'y a pas d'hypothèse entre un modèle et une représentation. Un modèle dispose donc de plusieurs représentations (ex : Représentation d'état, BondGraph, GIC, etc.). Différents types de représentation sont possibles : la représentation fonctionnelle et la représentation structurelle.

La représentation structurelle (ex : BondGraph (Figure 14) [Karnopp 1968] [Thoma 1975] [Filippa 2005], etc.) a l'avantage de pouvoir être faite très rapidement, sans analyse en amont à réaliser. Elle s'apparente à une association de composants. Le système est modélisé

tel qu'on le voit (image de la structure physique). Ce qui fait de cette représentation un outil important pour la conception et l'analyse. Malgré cet avantage, l'inconvénient principal de ce type de représentation est que tout type de causalité est autorisé. De ce fait, aucun lien « direct » avec la commande ne peut être déduit.

La représentation fonctionnelle a l'avantage de définir des règles de représentation ne dépendant pas de la structure mais de la fonction. Une étude du système en amont est nécessaire pour définir la représentation d'un système. Le Graphe Informationnel Causal (GIC) [Hautier 2004] (Figure 14) est un exemple de représentation fonctionnelle. Dans cette représentation, seule la causalité intégrale est autorisée. Cette représentation GIC permet, en utilisant des règles d'inversion de modèles, d'obtenir une structure de commande systématique.

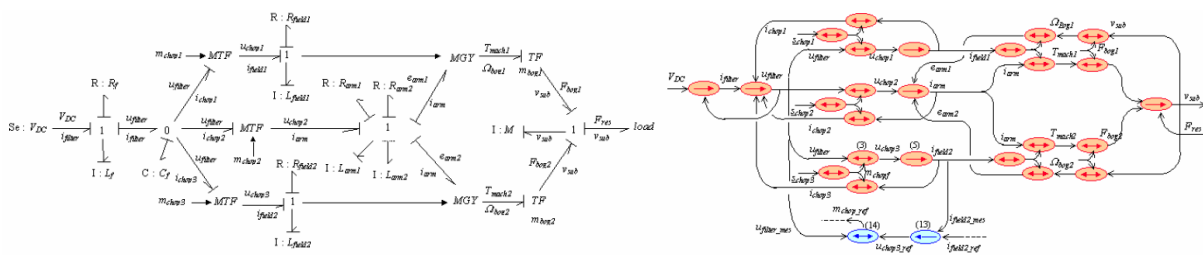


Figure 14 Représentations de la chaîne de traction d'un métro

automatique en utilisant le BondGraph et le GIC [Bouscayrol 2005]

Programme de simulation

Un programme de simulation est une organisation informatique d'une représentation permettant de simuler le comportement du système. Cette simulation est donc dépendante du programme utilisé et des méthodes de résolution numériques associées. Une représentation peut s'implémenter dans plusieurs programmes de simulation (ex : Programme en langage C, Matlab-Simulink, etc.). Comme les modèles, les programmes de simulation peuvent être séparés en deux catégories : les programmes de simulation à priorité fonctionnelle et les programmes de simulation à priorité structurelle.

Les logiciels de simulation à priorité structurelle, dépendant fortement du domaine d'application, sont nombreux : Autocad (dessin industriel), FEMM [Meeker 2005] (électromagnétisme), PSim et PSpice [Karady 2005] (logiciel circuit électrique). Dans un domaine aussi complexe que les chaînes de traction automobile, plusieurs logiciels de simulation à priorité structurelle sont disponibles sur le marché :

- Modelica[®] est un logiciel de simulation permettant de simuler les systèmes complexes. Certaines des bibliothèques de Modelica [Tiller 2001] [Fritzson 2011] sont gratuites et directement utilisables.

- Dymola[®] [Surhone 2010] est une version commerciale basée sur le langage Modelica. Il est multi-physique et est le plus souvent utilisé dans le domaine automobile, aéronautique et robotique.
- AMEsim[®] [Jere 2011] est un logiciel de simulation multi-physique utilisé dans des domaines divers. Il permet d'ajouter aux bibliothèques existantes ses propres bibliothèques, ce qui permet une « personnalisation » du logiciel. Il dispose également de bibliothèques de commande permettant, par exemple, la génération de signaux de commande de machines électriques.
- SimDriveline[®] [Kapila 2007] est une bibliothèque de composants automobiles (Figure 15) directement implantables dans MATLAB avec son interface graphique Simulink.
- PSAT (Powertrain Systems Analysis Toolkit) est un logiciel de simulation à priorité structurelle mis au point par le laboratoire national d'Argonne (Chicago, USA). Ce logiciel permet, à partir d'une simulation sous MATLAB-Simulink, d'analyser l'efficacité énergétique d'une architecture ou d'un composant. La nouvelle version de ce logiciel est appelée AUTONOMIE [Moawad 2011] [Shidore 2011]. Ce dernier dispose d'une grande bibliothèque de composants industriels permettant le test rapide de différentes architectures. Ce logiciel permet de fournir des avancées concernant l'implantation temps réel au travers de Model-In-the-Loop (MIL), Hardware-In-the-Loop (HIL), etc. [Autonomie 2012] (exemple d'utilisation du logiciel autonomie [Aziz 2011])
- ADVISOR [Markel 2002], a été développé en 1994. Son objectif principal a été de faciliter la mise en place de simulations permettant une meilleure compréhension des enjeux et des rendements inhérents aux véhicules électriques hybrides. Des bibliothèques de composants sont fournies et permettent d'estimer les économies de carburant et les gains en termes d'émissions sur différents cycles.

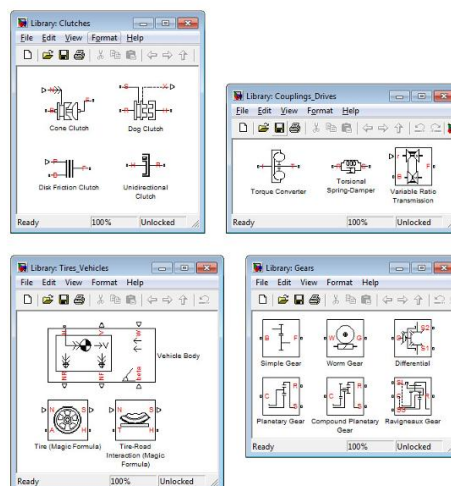


Figure 15 Bibliothèque Automobile de Simdriveline

Les logiciels de simulation à priorité structurelle restent aujourd’hui plus utilisés que les logiciels de simulation à priorité fonctionnelle pour la rapidité d’utilisation liée au « pick & place ». La plupart des constructeurs automobiles et centres de recherche développent leurs propres logiciels de simulation à priorité structurelle parmi lesquels on peut citer : SimVHP (PSA Peugeot Citroën) [Lemeilleur 2009] [Letrouvé 2011], VEHLib (Ifsttar (Figure 16)) [Trigui 2004] [Vinot 2008], Dynasty (Caterpillar).

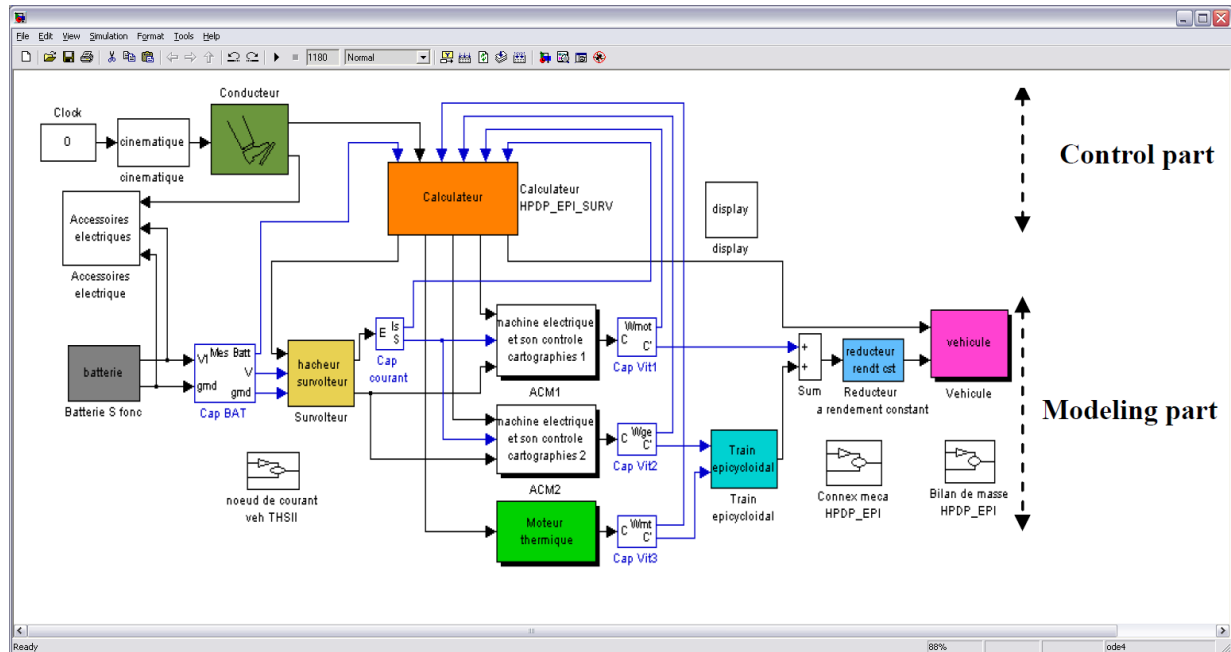


Figure 16 Simulation de la Toyota Prius II sous VEHLib [Chen 2010]

Contrairement aux programmes de simulation à priorité structurelle, les programmes de simulation à priorité fonctionnelle sont indépendants du domaine d’application du système étudié. Les programmes de simulation à priorité fonctionnelle sont : soit des logiciels mathématiques qui permettent d’écrire les équations directement : Matlab, Maple, Fortran etc., soit des logiciels plus « système » basés sur des bibliothèques de fonctions à relier par des liens virtuels : Matlab Simulink, Simplorer, etc.

I.2.b. Démarche classique structurelle

Malgré une complexification des motorisations, les constructeurs ont gardé la même démarche pour élaborer la commande des véhicules. Cette démarche est décomposée en plusieurs étapes (Figure 17).

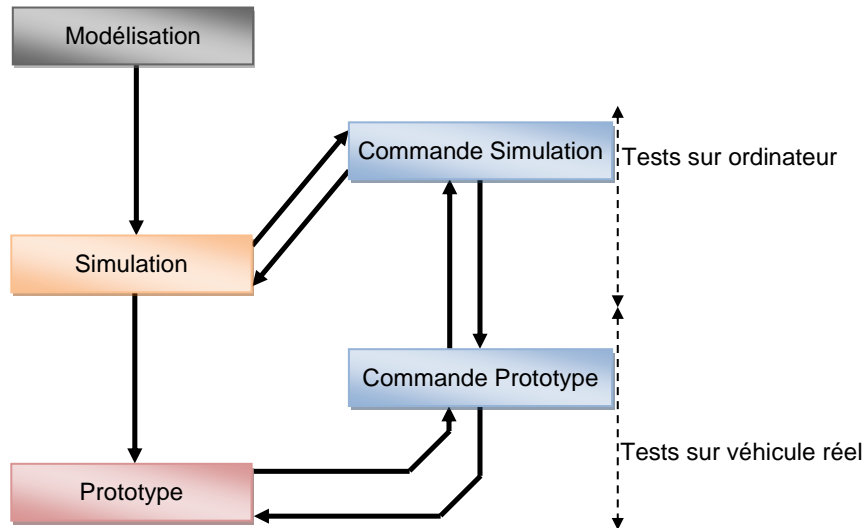


Figure 17 Schématisation de l'approche industrielle de l'élaboration de la commande

Simulation

La première étape dans l'élaboration de la commande est la simulation. Cette étape permet d'effectuer des tests rapides sur les avantages et les inconvénients de différentes architectures, de tester la dynamique du véhicule, d'effectuer plusieurs stratégies de gestion de l'énergie et d'effectuer une première validation de la commande. Dans le cadre d'une démarche industrielle, le passage entre l'étape de modélisation et l'étape de simulation est possible sans l'incorporation d'une étape de représentation. Ce passage est dû à l'utilisation de logiciels à priorité structurelle.

Véhicule réel

La deuxième étape de l'élaboration de la commande, avant l'implantation de série dans une chaîne de production, est l'étape de prototypage. Cette étape permet de mettre au point les derniers paramètres de la commande. En effet, une modification de la commande peut être effectuée par rapport à la simulation suite aux phénomènes non pris en compte en simulation (CEM, etc.). L'intérêt d'utiliser un prototype est de sécuriser cette première insertion de la commande effectuée sur le véhicule.

Les objectifs de cette étape sont :

- de valider l'intégration des composants dans un véhicule de série,
- d'adapter la commande à la topologie du véhicule (exemple : CEM, vibration, etc.),
- d'effectuer les dernières modifications avant l'application en ligne.

Commande « simulation » et commande « prototype »

L'inconvénient principal de cette démarche de travail est que, souvent, il n'y a pas de lien direct entre la commande « simulation » et la simulation ainsi qu'entre le prototype et la commande « prototype ». Ce manque de lien, lié au fait que l'on utilise un logiciel de simulation à priorité structurelle, provoque des allers-retours entre simulation et prototype qui

font perdre du temps. La commande « simulation » provient généralement d’anciens travaux sur un véhicule se rapprochant de celui étudié. Des modifications sont ensuite apportées pour représenter au mieux le système étudié. La commande « prototype » est donc une commande sensiblement différente de la commande « simulation ». En effet, il n’est pas rare que, pour des raisons de non-causalité, dû au logiciel de simulation à priorité structurelle, ou d’espace mémoire insuffisant dans le calculateur, la commande « simulation » ne puisse pas être transférable telle quelle en temps réel. Une étape d’interprétation entre les ingénieurs responsables des essais sur le prototype et les ingénieurs ayant développés les lois de commande en simulation est nécessaire.

I.2.c. Démarche fonctionnelle

Une première différence entre une démarche classique industrielle et une démarche fonctionnelle (Figure 18) est l’ajout d’une étape de représentation. Cette étape permet de mettre en forme la modélisation et d’avoir un lien entre la partie « représentation » et la partie « commande simulation » : comme il a été introduit précédemment, la représentation fonctionnelle peut permettre, via des règles d’inversion de modèle de définir une structure de commande systématique.

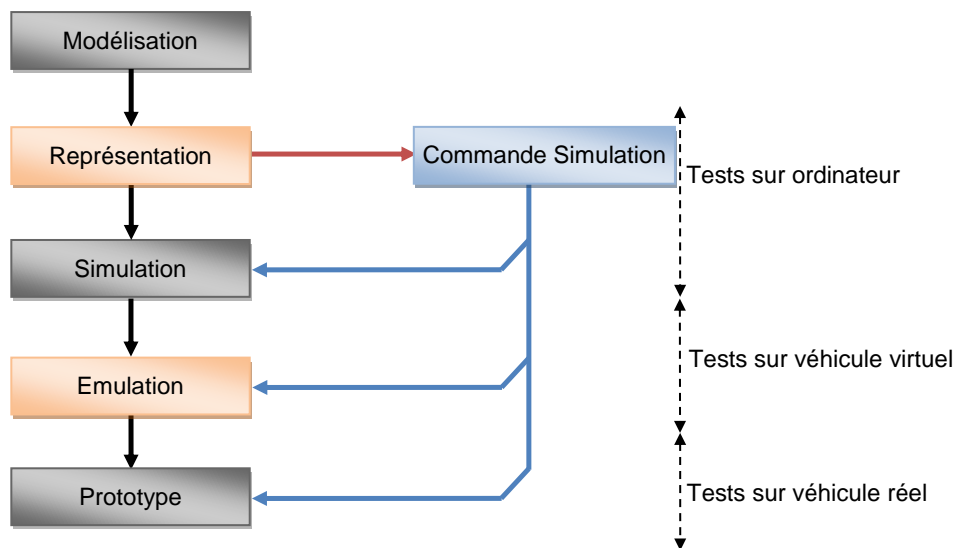


Figure 18 Schématisation de l’approche structurée de l’élaboration de la commande

Une représentation fonctionnelle utilisant la causalité intégrale exclusive est directement implantable en temps réel. De ce fait, la portabilité sur un émulateur ou sur un prototype est possible. Une étape de tests sur véhicule virtuel (émulation) permet de valider plusieurs données du cahier des charges avant le passage sur véhicule réel.

Emulation

Une étape importante dans l’élaboration d’une structuration de mise en place d’une commande d’un véhicule est le test de la commande temps réel développée en simulation. Le test de composants physiques seuls ou dans un système se complexifiant au fur et à mesure est

aussi possible dans le cadre d'une émulation temps réel : « HIL (Hardware-In-the-Loop) simulation » [Maclay 1997]. Cette étape peut être composée d'une émulation à échelle réduite, d'une émulation à pleine échelle ou les deux. L'émulation est une technique utilisée dans le développement et le test des systèmes complexes en temps réel où l'on utilise, contrairement aux simulations sur ordinateur, un ou plusieurs éléments « physiques », dans la boucle de simulation [Bouscayrol 2010 b] [Burbank 2011]. Il existe différents types de « simulation HIL » : la « simulation HIL » de type signal (SHIL), et la « simulation HIL » de type puissance (PHIL) [Trigui 2009] [Bouscayrol 2010 b]. Les différences et intérêts de chaque émulation seront approfondis dans le chapitre III.

L'émulation n'est pas, aujourd'hui, systématiquement réalisée lors de chaque étude de nouveaux prototypes. Le passage au travers de l'étape « émulation » peut se faire par différents chemins. Le chemin le plus long, mais aussi le plus sécuritaire (validation successive), passe par l'émulation à échelle réduite et l'émulation pleine.

I.3. Cahier des charges de la thèse

I.3.a. Positionnement scientifique

Positionnement national

Cette thèse est labélisée MEGEVH [MEGEVH 2007]. Le réseau national MEGEVH (Modélisation Energétique et Gestion de l'Energie des Véhicules Hybrides), créé en 2004, a pour objectif de travailler sur des méthodologies de l'élaboration de la commande sur différents véhicules et de favoriser les interactions entre les différents partenaires du réseau. Le réseau MEGEVH se compose en 2012, de 9 partenaires industriels dont PSA Peugeot Citroën, Renault, SNCF, Saft, etc. et de 10 laboratoires académiques dont le L2EP, FEMTO-st, LTE-IFSTTAR, etc. [MEGEVH 2012]

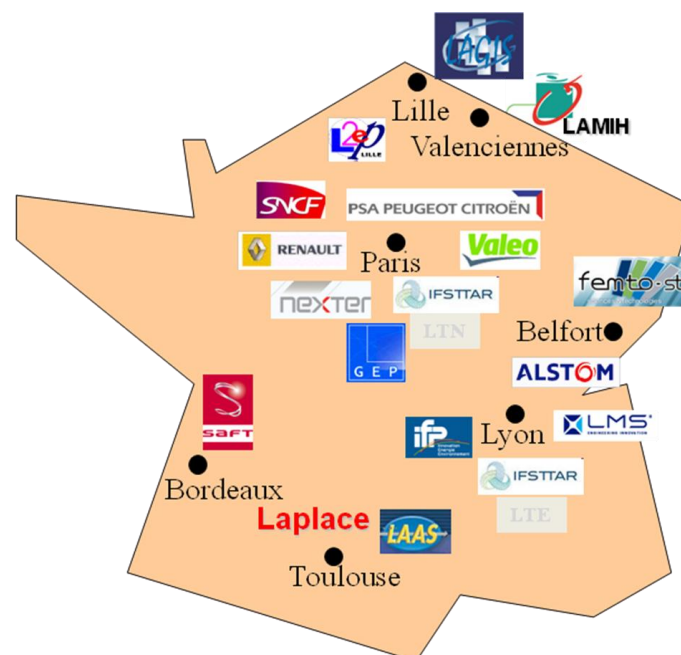


Figure 19 Partenaires du réseau national MEGEVH [MEGEVH 2012]

Deux niveaux d'étude sont effectués au sein de MEGEVH :

- un niveau théorique. Ce niveau permet de faire évoluer la méthodologie et le formalisme sur des aspects tels que la modélisation, la gestion d'énergie et l'optimisation énergétique de différentes chaînes de traction. MEGEVH-macro, optim et stratégie font partie de niveau théorique.
- un niveau applicatif. Ce niveau permet de tester les méthodologies développées dans l'autre niveau sur des véhicules de références (Toyota Prius, etc.), mais aussi sur de nouveaux véhicules innovants (Véhicule HYbrid4 de PSA, différents véhicules militaires)

Cette thèse, labélisée MEGEVH, est une collaboration entre deux partenaires du réseau : PSA Peugeot Citroën (La Garenne, DRD/DRIA/TASE/CO2E : Contrôle

Optimisation Energie et Emission) et le L2EP (Lille, équipe commande). Elle bénéficiera de ce fait des développements antérieurs du réseau, en particulier de ses thèses. Elle a aussi pour objectif de contribuer à l'avancement des connaissances du réseau au travers d'une application innovante.

Positionnement industriel

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la continuité d'un travail effectué dans le cadre d'une première collaboration entre PSA Peugeot Citroën et le L2EP concernant la réalisation d'un environnement de simulation et une modélisation fonctionnelle représentative d'un véhicule hybride double parallèle.

PSA Peugeot Citroën, comme beaucoup d'autres industriels, a développé et développe de nouveaux véhicules hybrides à différents niveaux d'hybridation. La complexité de ces véhicules ne permet plus de garder les mêmes lois de commande élaborées sur des précédents véhicules. Malheureusement, l'utilisation d'outils de simulation à priorité structurelle ne permet pas la liaison entre la représentation et la commande. De ce fait, la commande utilisée en simulation n'est, la plus part du temps, pas directement transposable en temps réel sur le prototype. La principale conséquence est une perte de temps inhérent à ces allers-retours entre la simulation et le prototypage. L'étude d'un nouveau véhicule en est d'autant plus complexe.

C'est pourquoi une structuration de la structure de commande basée sur une représentation fonctionnelle associée à une structuration des différentes étapes pour l'élaboration de la commande doit permettre de rendre l'approche plus linéaire et donc de réduire le temps de développement des futurs véhicules développés. Une capitalisation est ainsi possible.

Positionnement du laboratoire et MEGEVH

Le L2EP et plus particulièrement l'équipe commande est spécialisée dans les outils de représentation graphique parmi lesquels on retrouve le GIC [Hautier 1996], et la Représentation Energétique Macroscopique (REM) [Bouscayrol 2003]. Ces outils permettent, en utilisant des règles d'inversion de modèle, d'obtenir une structure de commande systématiquement.

Plusieurs travaux ont été engagés sur le thème des véhicules depuis plusieurs années au sein du laboratoire dans le cadre de MEGEVH. Ces travaux de thèse s'inscrivent donc dans la continuité de différents doctorats (Figure 20). Une partie de ces travaux de thèse ont servi de fondement à cette thèse :

- W. Lhomme (MEGEVH Stratégie, 2004 - 2007) : Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique [Lhomme 2007 b],
- K. Chen (MEGEVH Macro, 2006 - 2009) : Représentation énergétique macroscopique et structure de commande commune pour différents véhicules électriques hybrides [Chen 2009],
- L. Boulon (MEGEVH Macro, 2006 - 2009) : Modélisation multi-physique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie » [Boulon 2009],
- A-L Allègre (MEGEVH Stockage, 2007 - 2010) : Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides [Allègre 2010 b],
- S. Ali Syed (MEGEVH ANR Archybal, 2009 - 2012) : Représentation énergétique macroscopique et stratégie de gestion de l'énergie multi-niveau pour un véhicule hybride poids lourd utilisant un double train planétaire [Syed 2012].

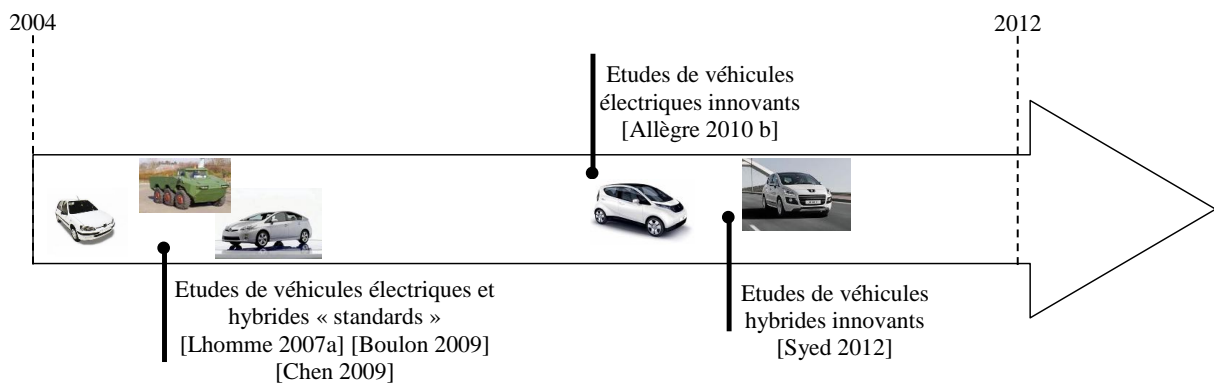


Figure 20 Schématisation positionnement de la thèse au sein des travaux du laboratoire

I.3.b. Véhicule étudié : Peugeot 3008 HYbrid4

PSA Peugeot Citroën a décidé d'utiliser une architecture particulière qui est, en fait, une topologie double parallèle. Un premier parallélisme est assuré par le moteur thermique et la machine électrique avant. Un deuxième parallélisme est assuré entre l'avant et l'arrière du véhicule. Cette architecture permet de se passer d'un répartiteur de puissance comme dans la Toyota Prius et d'avoir un meilleur facteur d'intégrabilité du système. Le GMP (Groupe MotoPropulseur) étudié (Figure 21) dispose donc de deux machines électriques et d'un moteur thermique. Cette architecture sera disponible sur plusieurs véhicules de Peugeot avec la 3008 HY4 et 508 RXH et de Citroën avec la DS5.

Dans ce véhicule, des motorisations avant et arrière sont présentes. Il est donc possible que le véhicule fonctionne en traction, propulsion ou 4x4. Pour comprendre le fonctionnement

de ce véhicule, il est nécessaire de le séparer en trois parties : l'avant, l'arrière et la partie électrique (centrale).

A l'arrière, la propulsion est effectuée par une machine synchrone de 27 kW qui permet de fonctionner en mode tout électrique à faible vitesse, et de récupérer de l'énergie lors des phases de freinage. Elle est couplée aux roues par un réducteur disposant d'un crabot. Un crabot permet de passer les vitesses « à l'arraché ». Il peut être vu comme un embrayage sans synchronisation. Dans cette application, le crabot permet de déconnecter la machine électrique arrière des roues lorsque la vitesse du véhicule dépassera 120 km/h pour des raisons de rendement.

A l'avant du véhicule, le moteur thermique (DW10C 2.0 HDI 163ch FAP) est couplé grâce à un système poulie / courroie à une machine électrique synchrone de 7 kW. Cette dernière a deux fonctions. Tout d'abord, elle remplace le démarreur conventionnel pour démarrer le moteur thermique du véhicule. Elle joue, ensuite le rôle d'alternateur pour recharger les batteries du véhicule et permet de récupérer de l'énergie pendant les phases de décélération, d'accélération voire même pendant les phases d'arrêt (phase dite hors traction).

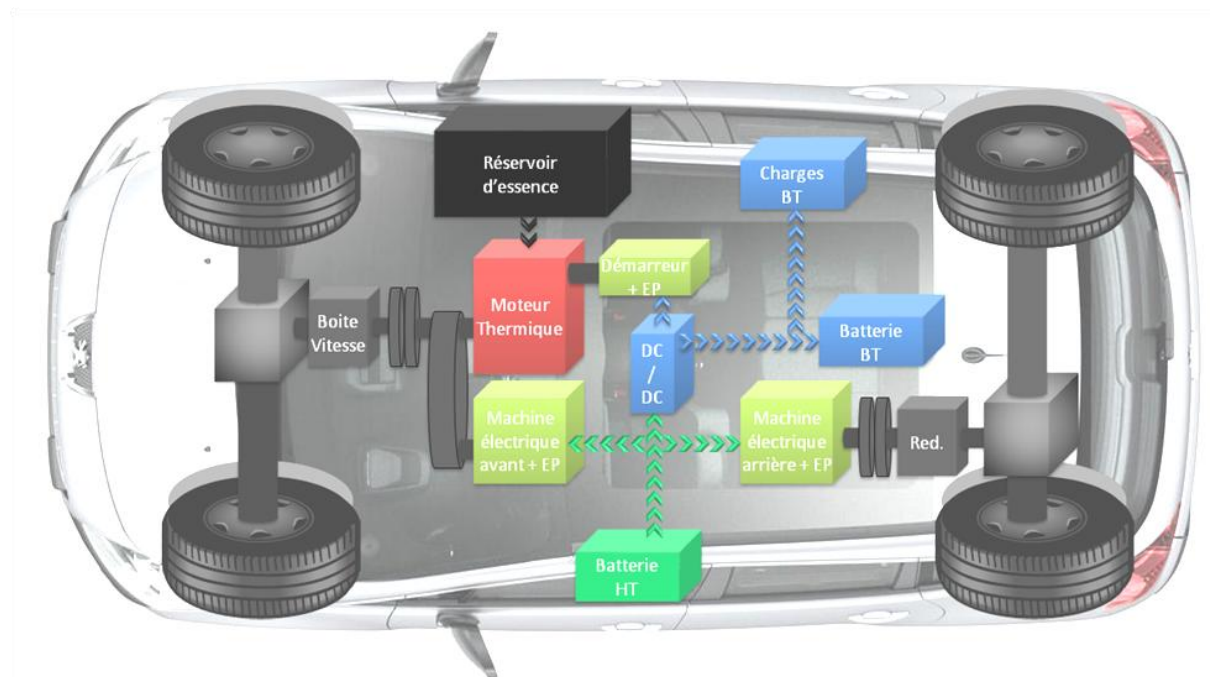


Figure 21 Synoptique du véhicule type HY-motion 4

La partie électrique se compose des deux onduleurs, des machines électriques couplées sur une batterie Haute Tension¹ (NiMH) de 220 V et sur un hacheur Haute Tension / Basse Tension. Le réseau Basse Tension, ici représenté en bleu, dispose d'une batterie plomb 12 V, des différentes charges de l'habitacle (autoradio, lumière, etc.) et d'un démarreur (machine à

¹ Aucune norme d'appellation des différents niveaux de tension embarquée dans une voiture n'est aujourd'hui figée. Nous appellerons donc Haute Tension une tension dépassant la tension d'une batterie plomb d'un véhicule thermique classique et basse tension la tension du réseau de bord.

courant continu). Le démarreur n'est, certes, plus beaucoup utilisé dans le véhicule étudié mais il est présent au cas où le véhicule circule dans des zones dites « froides ». Dans ce cas, seul le démarreur conventionnel démarrera le moteur thermique, la batterie plomb supportant mieux les basses températures que les batteries NiMh. La Figure 22 illustre le fait que les accumulateurs NiMh fonctionnent à des températures comprises entre -20°C et $+40^{\circ}\text{C}$. Néanmoins, à très basse température, leur performance peut diminuer jusqu'à 25% par rapport à la valeur nominale.

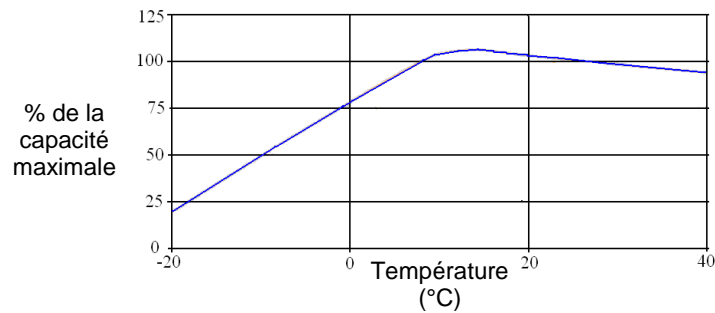


Figure 22 Comportement d'une batterie NiMh en fonction de la température

I.3.c. Organisation des travaux

Ce mémoire de thèse sera découpé en plusieurs chapitres. Ces derniers refléteront le cheminement de la thèse. L'objectif de ces travaux de thèse étant de proposer une commande unique de la simulation au prototype et ainsi éviter les nombreux allers-retours dans la phase de développement. Pour se faire, l'outil utilisé au L2EP, la Représentation Energétique Macroscopique (REM), sera utilisé dans ces travaux de thèse de doctorat comme moyen de représentation unifiant.

PSA Peugeot Citroën utilise un logiciel de simulation nommé SimVHP. Ce logiciel à priorité structurelle est composé d'une bibliothèque d'organes performante : tous les modèles des organes utilisés dans SimVHP proviennent soit de tests sur les organes réels, soit de données constructeurs. Il permet donc de capitaliser le savoir de la DRIA (Département de la Recherche et de l'Innovation Automobile) dans un seul outil de simulation. Cet outil n'est, aujourd'hui, pas remis en cause. L'inconvénient de ce logiciel, étant un logiciel de simulation à priorité structurelle, est qu'il ne permet pas d'avoir de lien direct entre la partie simulant le véhicule et la partie commande (appelé Supervision dans SimVHP). C'est pourquoi l'utilisation d'une représentation telle que la REM, permettant la systématisation de la structure de commande, est intéressante en ce sens. L'incorporation d'une telle structure de commande dans le logiciel SimVHP fera l'objet du chapitre II.

Suite à la validation sur le logiciel SimVHP, qui a permis de valider la portabilité de la commande dans un logiciel de simulation à priorité structurelle et de valider les hypothèses de

travail utilisées, une étape d'émulation a été mise en place. Cette étape d'émulation fera l'objet du chapitre III. Dans cette étape, deux émulations seront réalisées sur la plateforme « eV » (électricité et Véhicule) du L2EP comme cela a déjà été réalisé pour d'autres applications (métro / Siemens [Allègre 2010a], véhicule poids lourd / Nexter, système éolien). La première émulation sera une émulation à échelle réduite en utilisant des machines de 1,5 kW et non représentatives de la technologie des machines utilisées dans le véhicule réel. La deuxième émulation sera une émulation à pleine échelle (20 kW pour la machine arrière et 10 kW pour la machine avant). Ces machines disposent de la même technologie que celles utilisées dans le véhicule réel. La même commande développée en simulation sera utilisée dans ces étapes d'émulation.

La portabilité temps réel de la commande déduite de la REM, ayant été validée sur une plateforme expérimentale, sera appliquée dans un véhicule prototype. Le prototype utilisé est une Peugeot 308 disposant de l'architecture HYbrid4 mais de machines différentes par rapport à celles utilisées dans le véhicule commercialisé. Suite à cette expérimentation une étude sera réalisée pour pouvoir définir quel degré d'expérimentation est nécessaire (simulation, émulation, prototype) en fonction de l'objectif fixé. Cette dernière partie fera l'objet du chapitre IV.

1.4. Conclusion

Les enjeux sociétaux sont très forts dans la démarche de réduction des émissions de CO₂ pour laquelle le secteur de l'automobile a une place prépondérante. Depuis plusieurs années, la recherche sur des alternatives au moteur à combustion interne s'est fortement accélérée : les véhicules hybrides semblent être une bonne alternative à court et moyen terme. Un véhicule hybride est un véhicule combinant plusieurs sources d'énergie distinctes. Ces dernières contribuent à la propulsion de manières directes ou indirectes. Le véhicule électrique hybride est la technologie la plus souvent utilisée dans le domaine automobile pour des raisons d'intégration et de disponibilité énergétique. Plusieurs architectures ont été présentées y compris celle étudiée lors dans cette thèse : l'architecture double parallèle.

Le développement de la commande de ces nouveaux véhicules est particulièrement délicat étant donné la complexité de leurs architectures. Les commandes sont ainsi développées au cas par cas, et souvent par une approche heuristique qui nécessite une grande expertise. Cette démarche de développement utilise de manière importante la simulation. La commande élaborée en simulation doit très souvent être modifiée lors de l'implantation sur véhicule réel, de part la limite des logiciels structurels, très utilisés en Industrie.

Le logiciel de simulation utilisé par la DRIA de PSA Peugeot Citroën (SimVHP) et la démarche structurelle utilisée actuellement pour l'élaboration de la commande ne permettent pas d'avoir une approche progressive (sans allers-retours entre les différentes phases). C'est pour cette raison qu'une démarche innovante dans l'élaboration de la commande de la simulation au prototype est proposée. Cette démarche se base sur différents travaux effectués au sein du réseau MEGEVH et sur l'outil REM. Cet outil dispose de règles permettant d'obtenir une structure de commande systématique déduite de l'inversion de modèle. Il servira également d'outil unifiant. Cette démarche sera appliquée au véhicule 3008 HY4.

Chapitre 2 : Commande d'un véhicule HYbrid4 par inversion de sa représentation structurelle

Résumé du chapitre 2

Ce chapitre se situe dans la première étape de validation de la commande systématique : la simulation. L'objectif est de réaliser de manière efficace la commande par inversion d'un système complexe à partir d'une représentation structurelle. Pour effectuer cette commande par inversion, une démarche de travail est élaborée : tout d'abord, la représentation du véhicule étudié est effectuée en utilisant une représentation structurelle. Ensuite, en utilisant les différentes modélisations de la représentation structurelle, une représentation fonctionnelle permettant de définir une structure de commande basée sur l'inversion de cette représentation est développée. Enfin, le couplage entre la représentation structurelle et la commande issue de la représentation fonctionnelle est effectué dans un même logiciel.

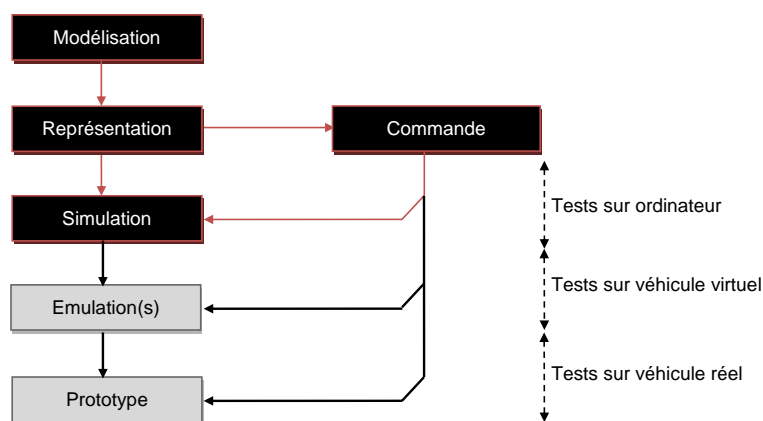


Figure 23 Schématisation de la partie testée dans ce chapitre

Plan du chapitre 2

II.1. Différentes approches de la structuration de la commande.....	30
II.1.a. Utilisation d'une représentation structurelle	30
II.1.b. Utilisation d'une représentation fonctionnelle	30
II.1.c. Intérêt du couplage des représentations.....	31
II.2. Représentations structurelle et fonctionnelle du véhicule étudié	35
II.2.a. Représentation structurelle : RepVHP	35
II.2.b. Représentation fonctionnelle : REM.....	40
II.3. Elaboration de la commande par inversion	51
II.3.a. Commande basée sur l'inversion de la REM	51
II.3.b. Stratégie de gestion de l'énergie	58
II.4. Simulation mixte dans un logiciel fonctionnel.....	63
II.4.a. Interface de couplage.....	63
II.4.b. Résultats de simulation	65
II.5. Conclusion.....	69

II.1. Différentes approches de la structuration de la commande

L'élaboration de la commande d'un système, au travers de la simulation, est fortement dépendante de différents aspects : la modélisation utilisée (hypothèses de simulation), le logiciel de simulation (à priorité fonctionnelle ou structurelle) et l'approche de la représentation (fonctionnelle ou structurelle). En effet, avec l'utilisation d'une représentation structurelle, la structure de commande sera moins systématique qu'avec une représentation fonctionnelle qui respectera la causalité intégrale. La causalité intégrale (ou causalité physique) unit la cause à l'effet : l'effet est toujours obtenu après la cause. Dans cette partie, les différents liens entre la représentation utilisée (structurelle ou fonctionnelle) et la structuration de la commande seront étudiés. Les intérêts d'un couplage entre ces deux représentations seront ensuite développés.

II.1.a. Utilisation d'une représentation structurelle

La première approche étudiée est celle effectuée à partir d'une représentation structurelle. Cette approche (Figure 24) peut être décomposée en plusieurs étapes. La première étape est la réalisation de la représentation structurelle. Cette représentation peut être rapidement élaborée au vu de la connaissance de l'architecture du véhicule étudié. Ensuite, à partir de bibliothèques d'organes, le passage entre la représentation effectuée et la simulation du système est rapidement réalisé. La représentation étant structurelle, il n'y a pas forcément de lien entre la représentation et la commande : la modélisation étant transparente pour l'utilisateur. La commande est réalisée de manière heuristique avec l'expertise que cela nécessite.

Cette approche est couramment utilisée par les industriels car elle permet la simulation rapide de différents systèmes utilisant différents organes. L'inconvénient de ce type d'approche est que le lien avec la commande n'est pas systématique.

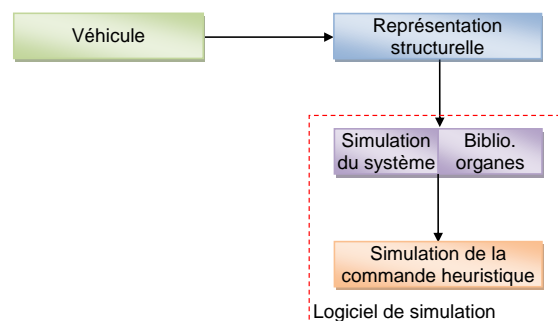


Figure 24 Approche structurelle de l'élaboration de la commande

II.1.b. Utilisation d'une représentation fonctionnelle

La deuxième approche étudiée est celle effectuée à partir d'une représentation fonctionnelle (Figure 25). Une représentation fonctionnelle, contrairement à une

représentation structurelle, ne peut être élaborée sans étude du système au préalable. En effet, la prise en compte ou non de certaines fonctions modifie la représentation. De plus, la causalité intégrale étant exclusive, il est nécessaire de résoudre les problèmes d'association en amont de la représentation. Ces problèmes d'association sont résolus de manière plus implicite dans une approche structurelle.

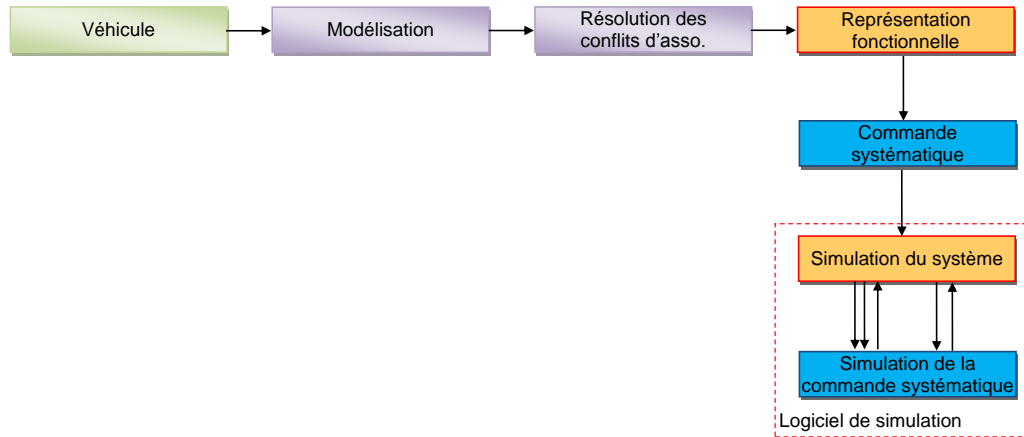


Figure 25 Approche fonctionnelle de l'élaboration de la commande

L'objectif principal de cette approche est de pouvoir définir des règles permettant la systématisation de la structure de commande. L'implantation de la commande et de la représentation dans un logiciel de simulation à priorité fonctionnelle se fait soit via les éléments de bas niveau de MATLAB-Simulink, soit via une bibliothèque de pictogramme (Figure 26) (ex : le Graphe Informationnel Causal (GIC) [Hautier 1996]).

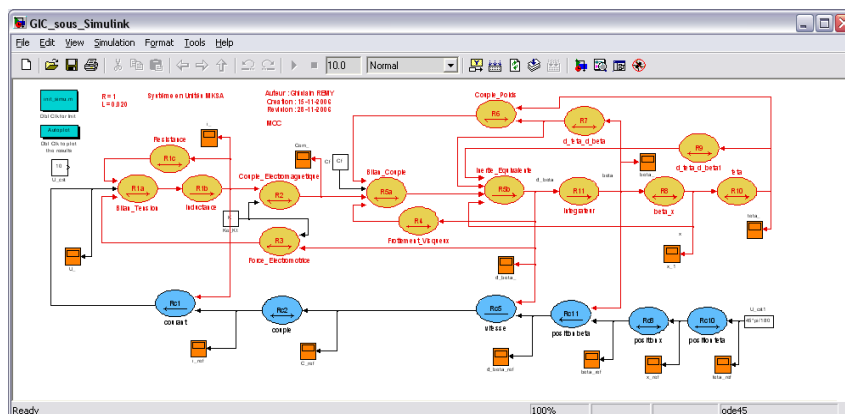


Figure 26 Implantation de la représentation dans un logiciel à priorité fonctionnelle [Bouscayrol 2005]

II.1.c. Intérêt du couplage des représentations

L'objectif est de coupler les principaux avantages des deux approches citées précédemment : la mise en simulation rapide du système à l'aide d'une bibliothèque comprenant les différents organes pouvant être implantés de la même façon que la structure, et une commande pouvant être systématiquement déduite à l'aide de règles et pouvant être implantable rapidement dans un logiciel de simulation.

L'élaboration de la commande suit donc le cheminement de la Figure 27. Comme pour l'approche structurelle, la simulation du système est directement déduite de la structure du système et utilise des bibliothèques d'organes prédéfinis. Pour pouvoir effectuer une représentation fonctionnelle issue de cette représentation structurelle, plusieurs étapes doivent être mises en place : définition de la modélisation effectuée dans la représentation structurelle, résolution des problèmes d'associations pouvant apparaître par la prise en compte de certaines hypothèses de modélisation. Grâce à cette représentation fonctionnelle, une structure de commande systématique peut être directement déduite et implantée dans un logiciel de simulation.

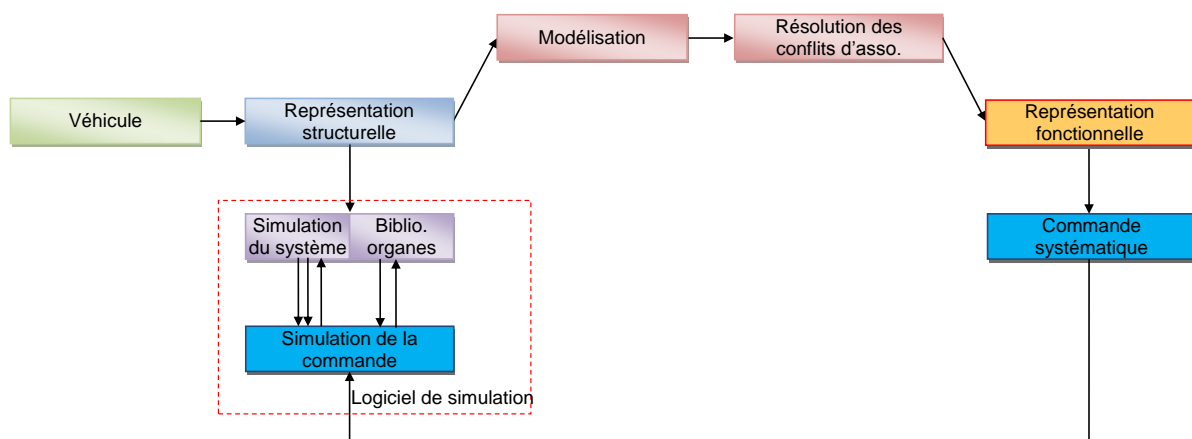


Figure 27 Cheminement de l'élaboration de la commande lors d'un couplage de représentation

Les logiciels de simulation pouvant être à priorité structurelle ou à priorité fonctionnelle, il existe plusieurs manières d'implanter la représentation structurelle et la commande systématique dans un logiciel de simulation (Figure 28).

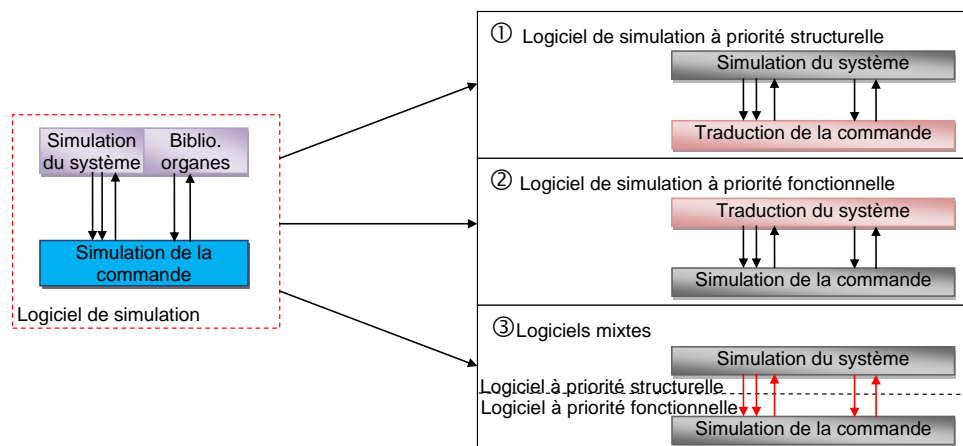


Figure 28 Couplage de représentation : utilisation dans différents logiciels

Des difficultés induites dépendent donc de la nature du logiciel de simulation utilisé :

- la première implantation (① Figure 28) peut se faire dans un logiciel à priorité structurelle. Dans ce type d'implantation la difficulté principale est la traduction de la commande dans le langage utilisé par le logiciel à priorité structurelle. Cette approche

a été testée dans le logiciel à priorité structurale PSIM en utilisant la REM comme représentation fonctionnelle permettant la systématisation de la structure de commande (Figure 29) [Delarue 2010].

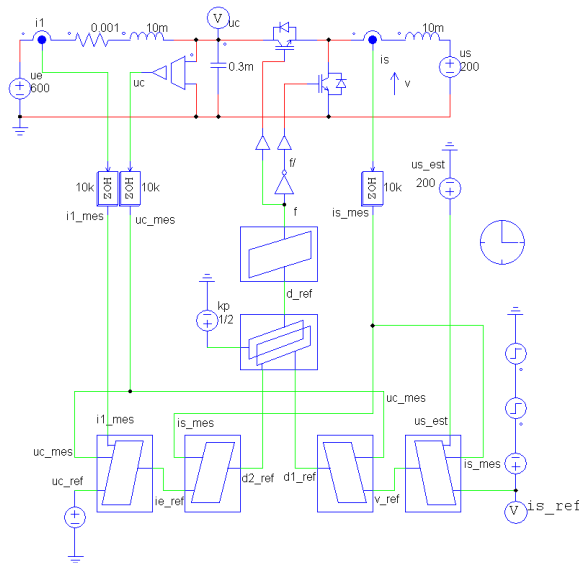


Figure 29 Exemple d'implantation de l'approche mixte dans un logiciel à priorité structurale : PSIM [Delarue 2010]

- la deuxième implantation (② Figure 28) peut se faire dans un logiciel à priorité fonctionnelle. Dans ce type d'implantation la difficulté principale est de trouver des astuces pour permettre de garder l'aspect bibliothèque d'organes dans un logiciel de simulation à priorité fonctionnelle. L'utilisation de ces bibliothèques d'organes doit pouvoir résoudre les problèmes d'association inhérents à la modélisation. Par exemple, un problème d'association courant lors de la simulation d'un véhicule est celui qui apparaît lorsque l'on veut prendre en compte l'inertie d'un moteur et celle du véhicule. Dans la bibliothèque de composants développée par l'Institut National de la Recherche sur les Transports et leurs Sécurité (INRETS), nommée VEHLIB, ce problème est résolu en faisant transiter l'inertie avec la variable d'action. Les différentes inerties sont additionnées lors de chaque passage d'organe. L'inconvénient avec cette implantation dans un logiciel à priorité fonctionnelle c'est que des « Solver » spécifiques doivent être mis en place pour permettre de simuler le système en un temps raisonnable. Cette approche a été réalisée en couplant : VEHLIB et la REM [Chen 2010] et en couplant SimVHP et la REM.

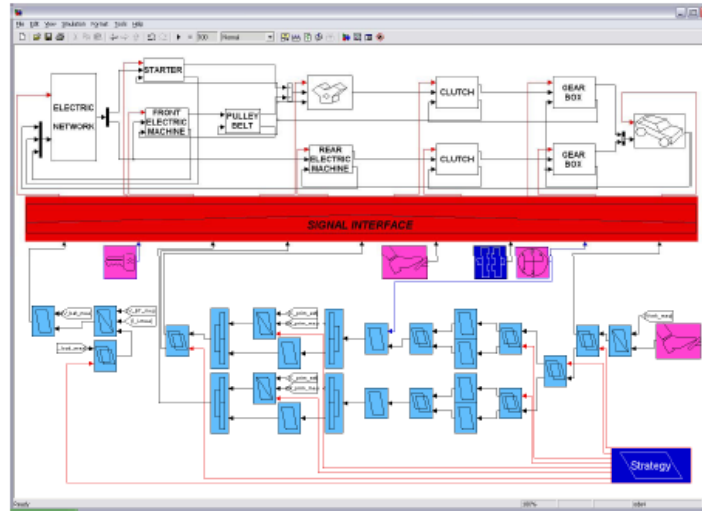


Figure 30 Implantation de l'approche mixte dans un logiciel à priorité structurelle. Ex : VEHLlib, REM

- la dernière implantation (③ Figure 28) peut se faire dans deux logiciels différents. Un logiciel à priorité structurelle pour implanter la simulation du système et un logiciel à priorité fonctionnelle pour implanter la commande. Ce type d'implantation que l'on nommera implantation dans logiciels mixtes est aussi appelé co-simulation. Dans ce cas, la difficulté est principalement basée sur l'interfaçage entre les deux logiciels. La co-simulation est basée sur l'exécution simultanée de deux logiciels de simulation. Soit les deux logiciels prennent en compte une partie du système et la commande associée à cette partie, soit ils prennent en compte la totalité du système et la totalité de la commande associée. Une interface de co-simulation doit permettre l'échange des données entre les deux logiciels de simulation. L'utilisation de la co-simulation doit donc respecter les contraintes des deux logiciels de simulation en termes de type de données, taille des données et surtout synchronisation temporelle [Ruelland 2002].

II.2. Représentations structurelle et fonctionnelle du véhicule étudié

Dans cette section la représentation structurelle du véhicule étudié est effectuée. Après explication des modèles utilisés, la représentation fonctionnelle permettant de définir une structure de commande systématique est développée (Figure 31). Par rapport à l'ensemble de la démarche proposée Figure 27, seules les étapes mises en évidence Figure 31 seront étudiées dans cette partie.

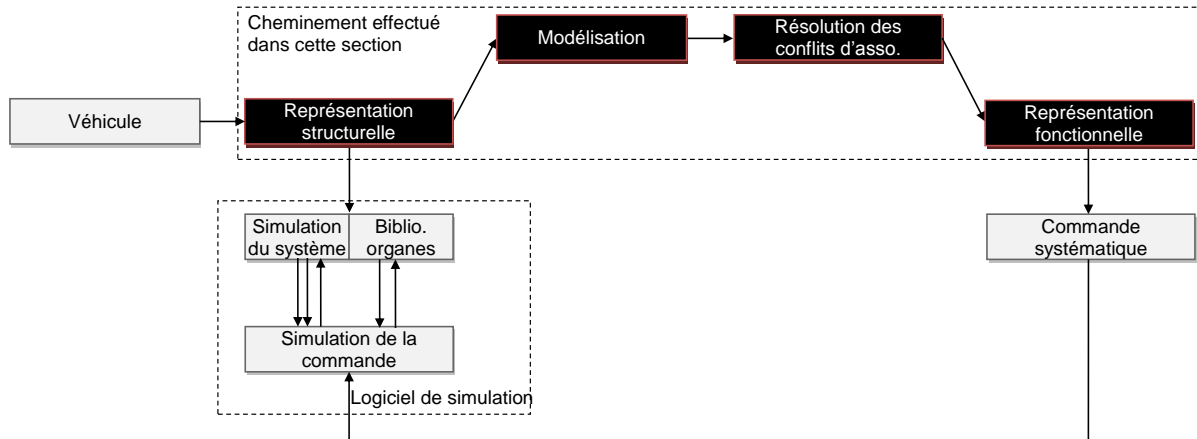


Figure 31 Approche Mixte de l'élaboration de la commande : Etapes concernées dans cette section

II.2.a. Représentation structurelle : RepVHP

Dans le domaine automobile, plus particulièrement chez PSA Peugeot Citroën, l'outil de représentation le plus répandu est le BondGraph [Paynter 1961] [Jaume 1998]. Le BondGraph est une représentation graphique structurelle de systèmes multi-physique [Karnopp 1968] [Thoma 1975] [Dauphin-Tanguy 1999] (mécanique, électrique, hydraulique, etc.) qui décrit les transferts d'énergie dans le système. Les BondGraphs sont basés sur le principe de conservation de la puissance via des variables de type flux / effort. Un flux représente un nombre de particules par unité de temps. Un effort représente la force avec laquelle le flux est poussé (Tableau 1). Le domaine de l'automobile étant un domaine multi-physique, le BondGraph a été rapidement adopté [Drozd 1991] [Filippa 2005].

Tableau 1 Variables flux / effort en fonction du domaine énergétique [Ould 2006]

Domaine énergétique	Effort	Flux
Electrique	La tension u (V)	Le courant i (A)
Mécanique rotation	Le couple C (Nm)	La vitesse angulaire ω (rad/s)
Mécanique translation	La force F (N)	La vitesse linéaire v (m/s)
Hydraulique	La pression (Pa)	Le débit volumique Q (m ³ /s)
Thermique	La température T (°K)	Le flux entropique dS/dt (J/(K.s))

Une représentation simplifiée (embrayage et crabot négligés, les machines synchrones sont remplacées par des machines à courant continu) du véhicule HYbrid4 est effectuée sous BondGraph sur la Figure 32. Les éléments constitutifs du BondGraph sont disponibles Annexe A.

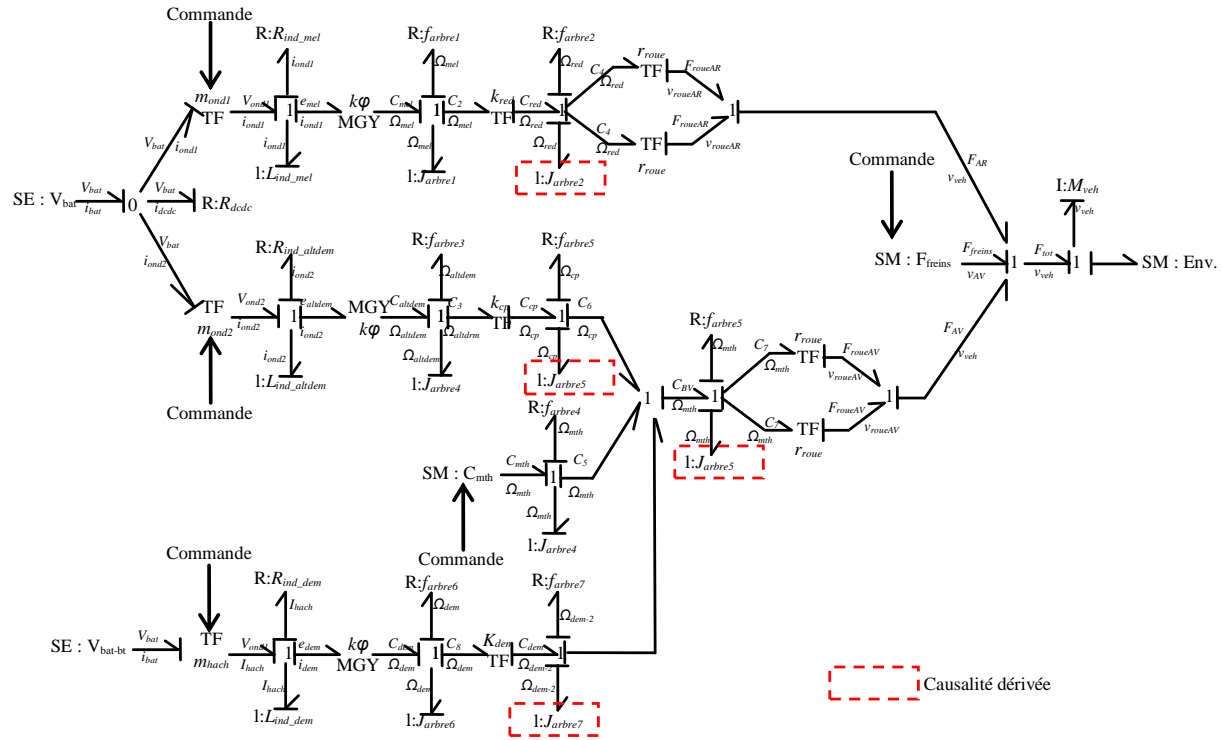


Figure 32 BondGraph simplifié du véhicule HYbrid4

Ce BondGraph présente les avantages de :

- distinguer les flux énergétiques des flux d'informations (forme de la flèche différente sur la Figure 32),
- mettre en évidence la causalité entre les efforts et les flux (cette causalité est ajoutée une fois que le schéma initial a été construit). Le BondGraph étant une représentation structurelle, la représentation d'un système est rapide et peut facilement être réalisée sans analyse en amont (cf. chapitre 1). Ce qui peut avoir pour conséquence de définir une causalité non physique (dérivée). La Figure 32 montre l'exemple de la prise en compte de 2 inerties de part et d'autre d'un réducteur. Cette prise en compte de 2 variables énergétiques entraîne une causalité dérivée.
- Pour les systèmes complexes, il est possible de réaliser un BondGraph à mots [Dauphin-Tanguy 2000] [Vergé 2004] (Figure 33) qui permet d'avoir un point de vue plus macroscopique du système.

La représentation issue du BondGraph à mots précédemment élaborée sera appelée : RepVHP.

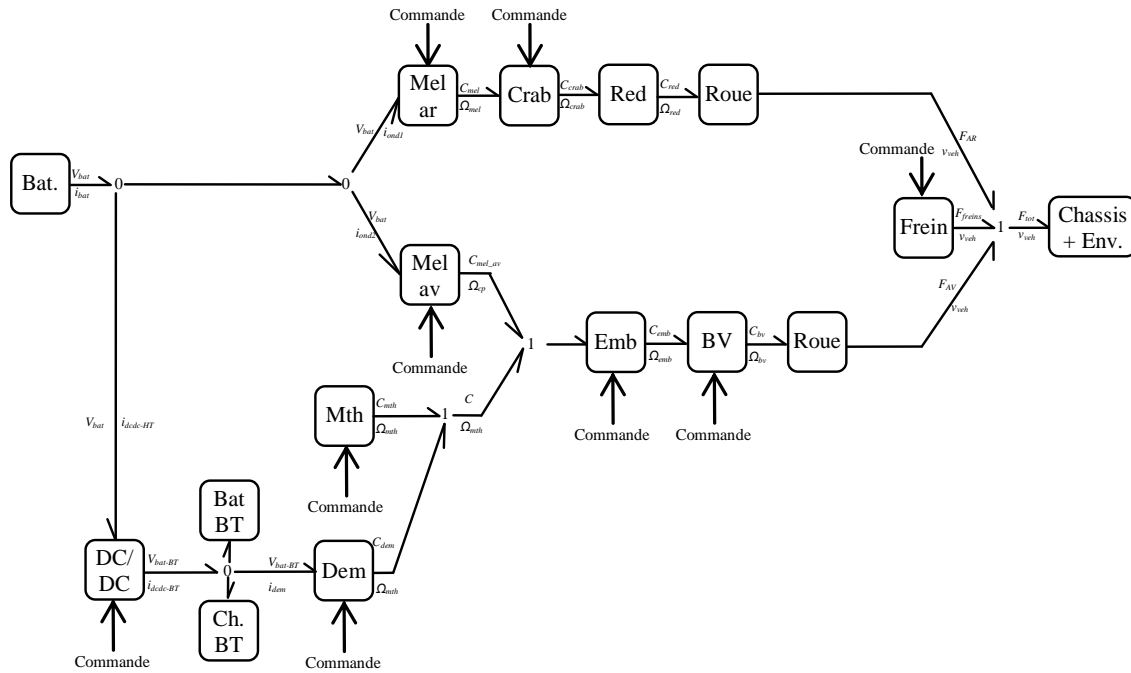


Figure 33 BondGraph à mots simplifié du véhicule HYbrid4 : RepVHP

Outil de Simulation SimVHP

Cette représentation a été implantée dans l'environnement de simulation *MATLAB – Simulink*[®] par PSA Peugeot Citroën (Figure 34) pour ne pas utiliser un autre logiciel de simulation strictement réservé au BondGraph. Cette simulation a été appelé SimVHP. *MATLAB – Simulink*[®] est un logiciel de simulation très utilisé aujourd'hui dans l'industrie automobile. Pour simuler les différents systèmes, une bibliothèque sous *Simulink* a été créée (Figure 34). Cette bibliothèque recense des blocs communément utilisés mais avec un jeu de couleurs différent.

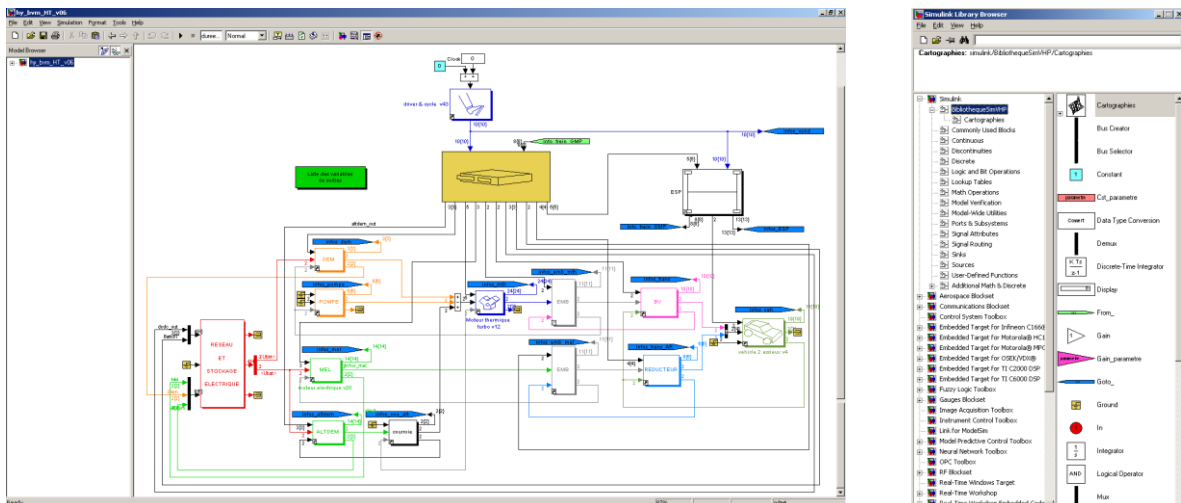


Figure 34 Implantation de RepVHP sous MATLAB-Simulink et bibliothèque associée

Nous pouvons ici remarquer plusieurs différences entre le BondGraph à mots réalisé précédemment (Figure 33) et l'incorporation de cette représentation dans le logiciel de simulation à priorité fonctionnelle:

- l'avantage du BondGraph qui permet de mettre en évidence les pertes dans le système a disparu,
- la vitesse donnée au démarreur, aux pompes et au système poulie/courroie n'est pas directement celle du moteur thermique mais celle sortant de l'embrayage,
- le moteur thermique est placé après le système poulie / courroie et non pas en parallèle, pour accentuer le fait que la vitesse de l'arbre du moteur n'est pas directement celle de l'alternodémarrreur. Ce placement permet aussi de mettre en évidence que cette représentation provient, historiquement, d'un véhicule thermique. Le moteur thermique est donc placé comme organe central de la représentation, les autres éléments se greffant à lui.
- le bloc véhicule prend en compte toute la partie « physique extérieur » du véhicule (les roues, les freins mécaniques, le châssis, les forces de résistances, etc.),
- les liens sont décomposés en deux liens : un lien flux et un lien effort.

Chaque organe de la simulation est composé de 3 entrées et 3 sorties (Figure 35) : une entrée commande, deux entrées flux / effort, une sortie mesures, deux sorties flux / effort.

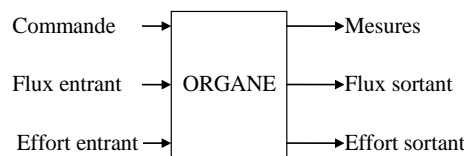


Figure 35 Représentation de chaque élément sous SimVHP

Pour garder l'aspect représentation structurelle disposant d'une bibliothèque de composants, la modélisation et la représentation issue du BondGraph ont subi plusieurs changements.

- SimVHP voulant respecter la causalité intégrale, certains paramètres transitent avec les variables énergétiques. En effet, si l'on prend l'exemple de 2 inerties de part et d'autre d'un réducteur (Figure 36), la prise en compte de ces deux inerties sans modifications amènerait une causalité dérivée. Pour palier ce problème, au lieu de calculer une inertie équivalente hors ligne, la valeur de l'inertie transitera avec la variable de flux et sera utilisée en bout de chaîne. Ce principe est utilisé dans d'autres logiciels de simulation comme VEHLIB [Trigui 2004].

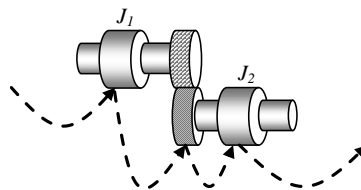


Figure 36 Prise en compte des inerties sous SimVHP

- Les organes devant fonctionner indépendamment, l'entrée « commande » n'est pas seulement composée de variables de commande mais aussi de données nécessaires au bon fonctionnement du modèle : température, état des éléments de découplage, etc.

SimVHP (Figure 37) est une interface logicielle, utilisée sous *MATLAB – Simulink*, permettant de mettre en commun la modélisation effectuée par tous les corps de métiers au sein de PSA Peugeot Citroën. En effet, toutes les personnes travaillant sur la modélisation d'un organe ou d'un véhicule peuvent, grâce à cette interface, travailler en commun sur un seul et même modèle ou architecture (exemple : HYbrid4, modèle moteur thermique, MildHybrid, etc.). L'utilisateur de cette interface peut effectuer différentes simulations avec différents organes ou commandes sans même regarder le fichier modèle de la simulation du véhicule. Cette interface regroupe plusieurs parties :

- La partie « architecture » permet de choisir l'architecture du véhicule étudié, ou celle dans laquelle l'organe à tester sera implanté.
- La partie « organe » permet aux personnes « expertes » d'un domaine de mettre à jour les informations de chaque organe. Les personnes utilisant ces organes peuvent directement utiliser les fiches pour mettre à jour les informations relatives à chaque organe.
- La partie « stratégies de commande » permet de choisir les différentes stratégies à utiliser pour l'architecture concernée.
- La partie « Cycles » permet de définir quel cycle utiliser dans cette simulation. Différents cycles sont possibles, à l'instar de cycles « normés » (ex : NEDC, etc.) d'autres cycles types roulage ville et ville embouteillée propres à PSA Peugeot Citroën sont également disponibles.

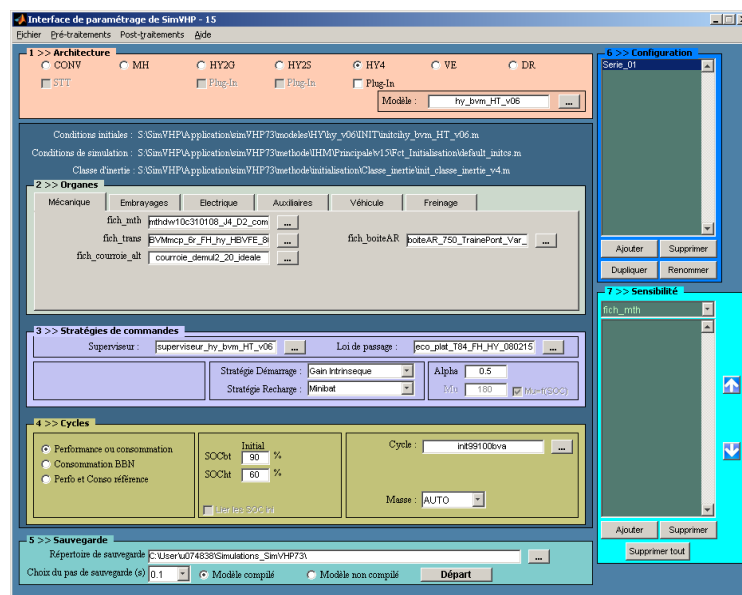


Figure 37 Interface SimVHP

II.2.b. Représentation fonctionnelle : REM

La Représentation Énergétique Macroscopique

La REM a été développée au L2EP [Bouscayrol 2003] pour proposer une version macroscopique du Graphe Informationnel Causal (GIC) [Hautier 1996]. Elle permet de représenter le système et de proposer une structure de commande du système étudié basée sur l'inversion de la REM. Elle se focalise sur les échanges de puissance des diverses composantes selon le principe de l'action et de la réaction. Il faut noter que les entrées et les sorties de chacun des blocs sont définies selon le principe de la causalité intégrale. Les éléments constitutifs de la REM sont disponibles en Annexe C.

La REM permet donc de modéliser de manière synthétique les systèmes de conversion complexes, et en particulier les Systèmes Multi-machines Multi-convertisseur (SMM), pour lesquels elle a été développée à l'origine [SMM 2000]. Elle permet une aide précieuse à la structuration de la simulation de tels systèmes. Une Structure Maximale de Commande (SMC) se déduit par des règles d'inversion étendues de celles du GIC, et permet de dégager rapidement et systématiquement une structure de commande.

La REM est utilisée pour disposer d'un outil de représentation et d'élaboration d'une commande pour des systèmes complexes couplés. Elle est utilisée dans différents domaines par différents acteurs industriels : Renault, Siemens Transportation Systems : Métros [Verhille 2004] [Verhille 2007a] [Horrein 2012b], Valeo : Alternodémarrateur heptaphasé [Bruyere 2008], PSA Peugeot Citroën : Véhicule hybride HYbrid4 [Letrouve 2009a] et véhicule thermique [Horrein 2012a], Nexter : véhicule militaire DPE 6x6 [Boulon 2009] et véhicule poids lourd hybride disposant d'un double train planétaire [Syed 2010], SNCF : locomotive hybride [Baert 2011] [Mayet 2012] [Pouget 2012], enrouleur de bande [Leclercq 2004] [Thiffault 2004], etc. La REM garde toute sa lisibilité dans des applications où les moteurs et les couplages sont nombreux.

La REM se base principalement sur 3 principes :

- le principe d'interaction : le système est décomposé de sous-systèmes (fonctions) en interactions : les sources (ovales verts), les éléments d'accumulation d'énergie (rectangles oranges barrés), les éléments de conversion d'énergie sans accumulation d'énergie (ronds oranges pour les conversions multi-physiques, carrés oranges pour les conversions mono-physiques), les éléments de couplage (pictogrammes superposés, ronds oranges pour les couplages multi-physiques et carrés oranges pour les couplages mono-physiques). Tous les éléments sont reliés selon le principe d'action – réaction. Le produit des variables d'action et de réaction entre deux éléments mène à la puissance instantanée échangée.
- le principe de causalité : seule la causalité intégrale est prise en considération dans la REM. Cette propriété définit les entrées et les sorties des éléments ayant des dépendances

temporelles : les éléments d'accumulation. Les entrées et sorties des autres éléments sont imposées par ces éléments d'accumulation.

- le principe d'inversion : une structure de commande peut directement être déduite de la REM du système en utilisant des règles d'inversion. L'utilisation de ce principe est disponible en II.3.

REM du véhicule HYbrid4

Pour simplifier la mise en représentation REM du véhicule étudié, nous allons décomposer le système en 4 parties. La modélisation, les hypothèses inhérentes, effectuée dans le logiciel de simulation de PSA Peugeot Citroën est disponible en annexe B. Ces modèles seront utilisés pour développer la REM.

Le « Réseau électrique HT » - Il se compose de la batterie HT, du convertisseur DC/DC permettant de fournir de l'énergie au réseau de bord par la batterie haute tension, sans augmenter l'utilisation de la batterie basse tension et des onduleurs des machines électriques. Les batteries haute et basse tension sont modélisées de la même manière et en plusieurs étapes:

La batterie haute tension – ① La première consiste à calculer le courant de la batterie haute tension (1)

$$i_{bat-ht} = i_{mel-av} + i_{mel-ar} + i_{aux-ht} + i_{DCDC-ht} \quad (1)$$

avec $i_{aux-ht} = \frac{P_{aux_ht}}{V_{bat_ht}}$

avec i_{mel-ar} et i_{mel-av} , les courants des machines électriques arrière et avant ; i_{aux-ht} et $i_{DCDC-ht}$, les courants des auxiliaires hautes tensions et du hacheur ; P_{aux_ht} , la puissance des auxiliaires sur le réseau haute tension.

② La deuxième permet de calculer l'état de charge de la batterie (2)

$$SoC_{ht} = SoC_{ini-ht} - \frac{1}{3600C_{nom-ht}} \cdot \int i_{bat-ht} \cdot dt \quad (2)$$

avec SoC_{ini-ht} , l'état de charge initial de la batterie ; C_{nom-ht} , la capacité nominale de la batterie.

③ Le calcul de la tension de batterie : la tension à vide est calculée à partir d'une cartographie en fonction du SoC_{ht} et de la température ($u_{0-ht} = f(SoC_{ht}, T^{\circ}C)$). Ensuite, la résistance interne de la batterie est calculée à partir de cartographie en fonction du SoC_{ht} et du courant de batterie ($R_{int-ht} = f(SoC_{ht}, i_{bat-ht})$). Enfin, la tension de batterie est calculée à partir de (3)

$$v_{bat_ht} = u_{0-ht} - R_{int-ht} \cdot i_{bat-ht} \quad (3)$$

Avec u_{0-ht} , la tension à vide de la batterie HT ; R_{int-ht} , la résistance interne de la batterie.

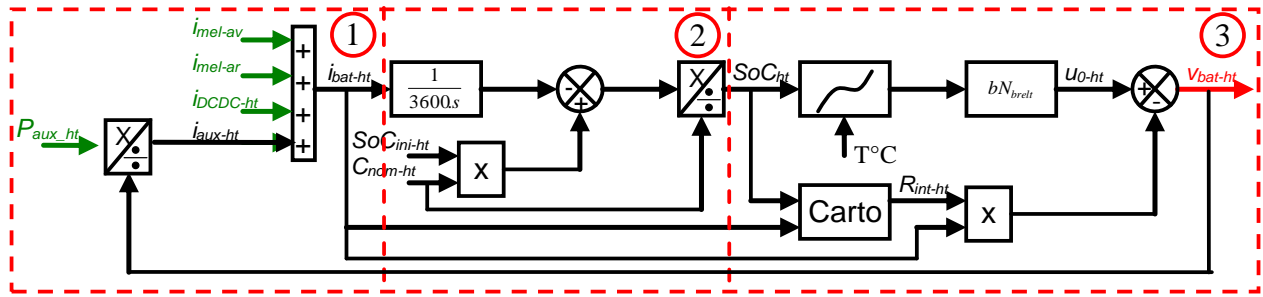


Figure 38 Représentation de la batterie haute tension sous SimVHP

Le nœud électrique HT - Pour bien entreprendre ce couplage électrique, il faut séparer en deux le problème, c'est-à-dire effectuer un couplage électrique à chaque nœud.

Le premier nœud représenté par un élément de couplage mono-physique (en rouge sur la Figure 39) suit l'équation suivante :

$$\begin{cases} v_{bat-HT} \text{ commun} \\ i_{mel-tot} = i_{mel-av} + i_{mel-ar} \end{cases} \quad (4)$$

Le deuxième nœud (en bleu sur la Figure 39) suit l'équation suivante :

$$\begin{cases} v_{bat-HT} \text{ commun} \\ i_{bat-HT} = i_{mel-tot} + i_{dcdc-HT} \end{cases} \quad (5)$$

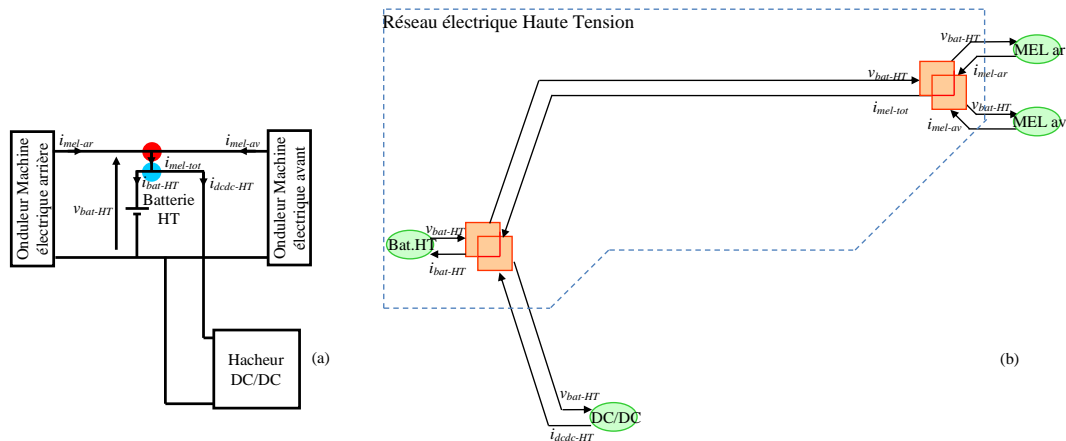


Figure 39 Réseau électrique HT : (a) schéma structurel, (b) REM

Le « Réseau électrique BT » - Il se compose de l'inductance de lissage (non représentée car le convertisseur DC/DC est modélisé de manière statique) en sortie du convertisseur DC/DC, de la batterie BT, des charges BT et du démarreur avec son mécanisme associé (Figure 40).

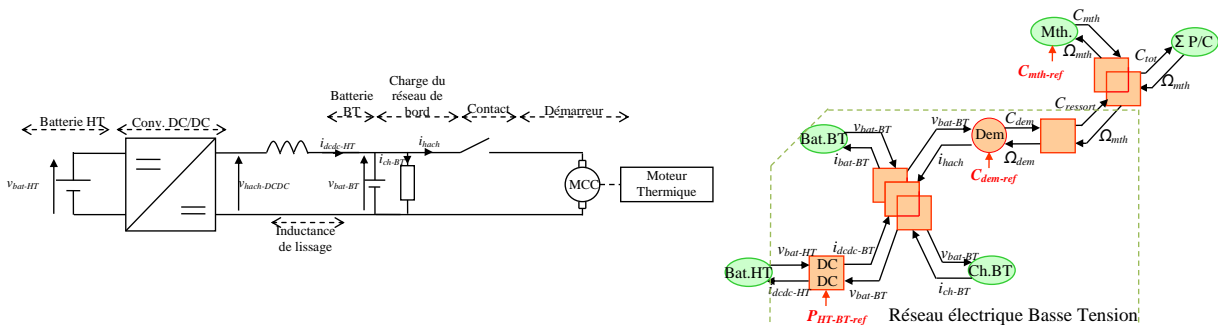


Figure 40 Réseau électrique BT : (a) schéma structurel, (b) REM

Convertisseur DC / DC – Le convertisseur DC/DC n'est pas commandé par son rapport cyclique ($m_{DC/DC}$) mais par la puissance transitée entre le réseau haute tension et le réseau basse tension ($P_{HT-BT-ref}$). Comme pour les modèles statiques des machines électriques, cette modélisation prend en compte également la commande rapprochée de cet ensemble (Figure 41).

Le convertisseur DC/DC est modélisé en deux étapes. La première étape permet de définir le courant de batterie du côté basse tension en fonction de la tension de la batterie basse tension et de la puissance de consigne entre le réseau haute tension et le réseau basse tension (6).

$$i_{DCDC-BT} = -\frac{P_{HT-BT-ref}}{V_{bat-BT}} \quad (6)$$

avec $P_{HT-BT-ref}$, la consigne représentant la puissance transitant entre le réseau HT et BT.

La deuxième étape calcule le courant du convertisseur du côté haute tension. En effet, le courant coté haute tension est égal au courant coté basse tension multiplié par le rendement du convertisseur (η_{DCDC}) ainsi que son rapport de modulation, rapport des tensions.

$$i_{DCDC-HT} = -i_{DCDC-BT} \cdot m_{DCDC} \cdot \eta_{DCDC}$$

$$avec \ m_{DCDC} = \frac{V_{bat-HT}}{V_{bat-BT}} \quad (7)$$

avec m_{DCDC} , le rapport de conversion entre la tension du réseau haute tension et la tension du réseau basse tension ; η_{DCDC} , le rendement du convertisseur DC/DC.

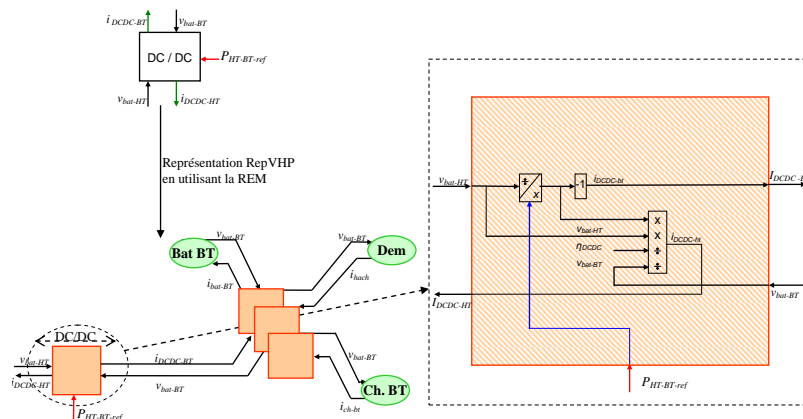


Figure 41 Représentation du DC/DC en utilisant l'approche REM

Nœud BT – Le nœud BT correspond à un élément de couplage mono-physique. L'équation des courants qui provient de la loi des nœuds est la suivante :

$$\begin{cases} v_{bat-BT} \text{ commun} \\ i_{dcdc-BT} = i_{ch-BT} + i_{hach} + i_{bat-BT} \end{cases} \quad (8)$$

Charge BT - Pour prendre en compte tous les appareils de bord du véhicule, nous considérons une charge du réseau de bord constante de 2 kW. Elle sera représentée par une source d'énergie. Elle sera calculée de la façon suivante :

$$R_{charge} = \frac{V_{bat-BT}^2}{P_{charge}} \quad (9)$$

Démarrreur (Machine à Courant Continu) - Les moteurs à combustion requièrent une aide au démarrage. Pour atteindre le régime nécessaire au lancement du moteur (moteur diesel : 80 à 200 tr/min) avec un petit démarreur dont la vitesse de rotation est nettement supérieure, on insère un démultiplicateur élevé (1/10 à 1/20). Après le lancement du moteur thermique, ce dernier accélère très rapidement ; après quelques cycles d'allumage, la vitesse de rotation du moteur thermique est telle que le moteur du démarreur ne peut plus suivre. Pour que le démarreur n'atteigne pas des vitesses de rotation trop élevées pendant la phase de dépassement, une roue libre interrompt la liaison énergétique. Une fois la clé de contact relâchée, un ressort désolidarise le démarreur du moteur thermique et le remet dans sa position de repos. Dans notre application, la roue libre ne sera pas prise en compte car, sur ce véhicule hybride, le démarreur conventionnel n'est utilisé qu'en cas de défaillance. Nous effectuerons un cycle de démarrage du démarreur sans le connecter au moteur thermique juste pour tester son bon fonctionnement. Ce démarreur est modélisé de manière quasi-statique. Sa REM consiste alors en un élément de conversion multi-physique sans accumulation d'énergie.

Pour démarrer le moteur thermique par le démarreur, comme effectué sur un véhicule thermique classique, nous avons besoin de 2 états :

- l'état fermé correspond au moment où l'on va fermer (mettre) le contact.
- l'état ouvert correspond au moment où l'on lâche la clé et donc, où la machine ne fournit plus aucun couple.

Lorsque le couple du démarreur C_{dem} sera égal à $C_{dem-max}$, cela correspondra à la mise en place de la clé de contact sur la position « démarrer » par l'utilisateur. Lorsque C_{dem} est égal à 0 Nm cela peut correspondre au moment où la clé est relâchée par le conducteur. En interconnectant le moteur thermique avec le démarreur via un couplage mécanique, nous obtenons la REM globale du réseau BT (Figure 40).

La « Chaîne de traction avant » - Elle se compose de la machine électrique avant couplée via un système poulie / courroie au moteur thermique, d'un embrayage, d'une boîte de vitesse, du différentiel avant et des roues.

Les machines électriques avant et arrière - La modélisation des machines électriques est décomposée en 2 étapes (Figure 42):

La première étape de cette modélisation a pour objectif de calculer le couple fourni par la machine. Ce couple est égal au couple de référence à une constante de temps près.

La deuxième étape a pour objectif de calculer le courant transisant entre les machines électriques et la batterie haute tension. Pour cela, l'équation de l'égalité des puissances est utilisée (10)

$$i_{mel} = \frac{P_{ELEC}}{V_{bat-HT}} = \frac{P_{méca} - P_{pertes}}{V_{bat-HT}} = \frac{C_{mel} \cdot \Omega_{mel} - P_{pertes}}{V_{bat-HT}} \quad (10)$$

Avec P_{pertes} , la puissance représentative des différentes pertes de la machine et de son onduleur.

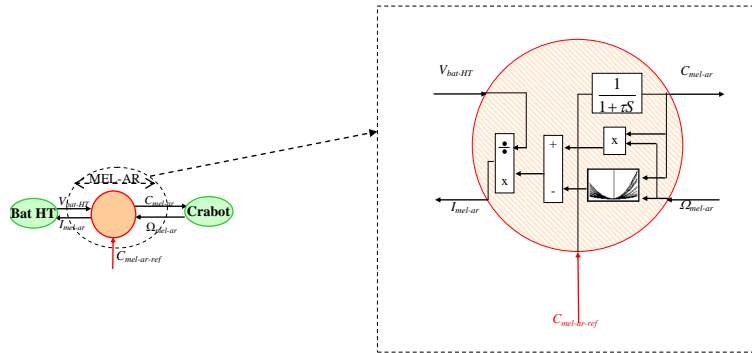


Figure 42 Modélisation des machines électriques avant et arrière

Suite à plusieurs études effectuées au laboratoire [Letrouve 2010] [Horrein 2011], il a été remarqué que l'utilisation de modèles statiques ou quasi-statiques, comprenant le modèle de la machine, de son électronique de puissance associée et sa commande rapprochée, est judicieux en simulation sur plusieurs points si les cartographies effectuées sont assez précises et représentatives des machines étudiées :

- les temps de simulation des modèles quasi-statiques (11,642 s pour un cycle de 195 s) et statiques (10,377 s pour un cycle de 195 s) sont largement en dessous du temps de simulation des modèles dynamiques (18,198 s pour un cycle de 195 s),
- les dynamiques globales entre les modèles dynamique et quasi-statique sont très proches (Figure 43). La différence entre les dynamiques du modèle dynamique et du modèle quasi-statique est inférieure à 1%,

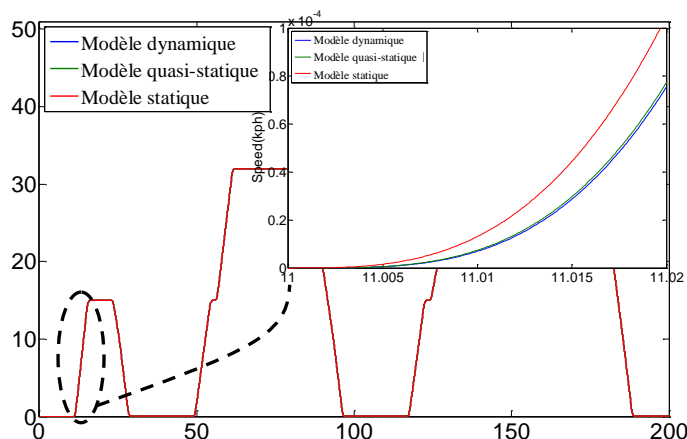


Figure 43 Comparaison des dynamiques entre les différents modèles des machines électriques

- la différence entre les pertes et donc les rendements des différents modèles est très faible : inférieure à 1%. De ce fait, ces modèles sont suffisants pour des études sur la consommation et sur le test de différentes stratégies de gestion de l'énergie.

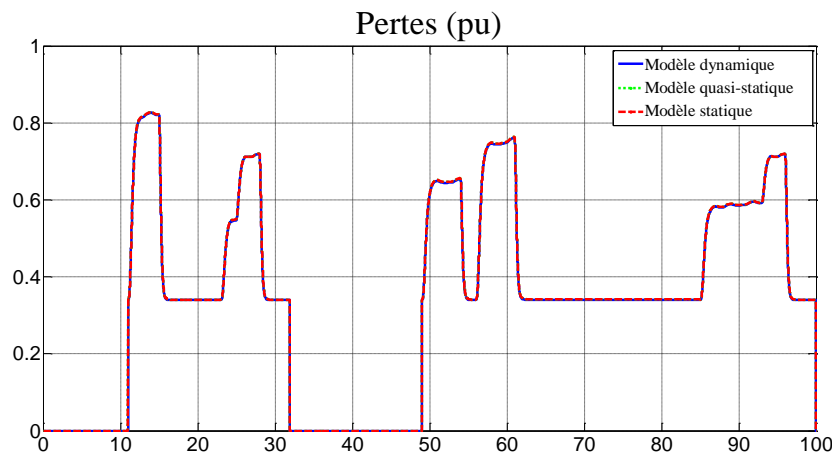


Figure 44 Comparaison des pertes entre les différents modèles des machines électriques

Le système poulie / courroie - En REM, le modèle du système courroie / poulie permet d'additionner les couples provenant de la machine électrique avant et du moteur thermique tout en mettant un facteur représentant la différence de diamètre des deux poulies. Le système courroie poulie devrait être représenté par deux blocs différents en REM : le premier serait un bloc de conversion mono-physique (mécanique / mécanique) représentant la modulation de la vitesse et du couple en sortie de la machine électrique avant, le deuxième serait un élément de couplage permettant d'assembler les couples provenant de la machine électrique avant et du moteur thermique. Dans cette représentation, le système courroie poulie a été décrit par un seul élément de couplage disposant d'un rapport sur le couple de la machine électrique avant.

Sous SimVHP, le modèle du système courroie / poulie ne représente que la modulation de la vitesse et du couple de la machine électrique avant. Le couplage entre le moteur thermique et la machine électrique avant est effectué par un bloc externe (Figure 45).

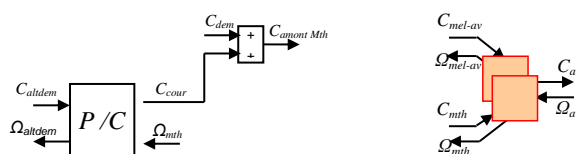


Figure 45 Comparaison de la représentation du système Courroie / Poulie

Remarque sur la prise en compte des couplages – RepVHP implantée dans MATLAB-Simulink ne semble pas avoir de règle précise sur ce point. Selon le cas, les couplages se font soit à l'intérieur des blocs (exemple : batterie HT, batterie BT) (Figure 46①) ou à l'extérieur des blocs (exemple : couplage mécanique entre la machine électrique avant et le moteur thermique) (Figure 46②). Contrairement à la REM, dont la mise en évidence des couplages est l'un des points forts. En effet, les couplages sont représentés systématiquement sous la forme de doubles pictogrammes (carré si le couplage est mono-physique et rond si le

couplage est multi-physique). Cette mise en évidence permet, en effectuant la commande par inversion, de mettre en évidence les différents degrés de liberté du système, c'est-à-dire les différents endroits où l'utilisateur peut agir pour effectuer sa stratégie.

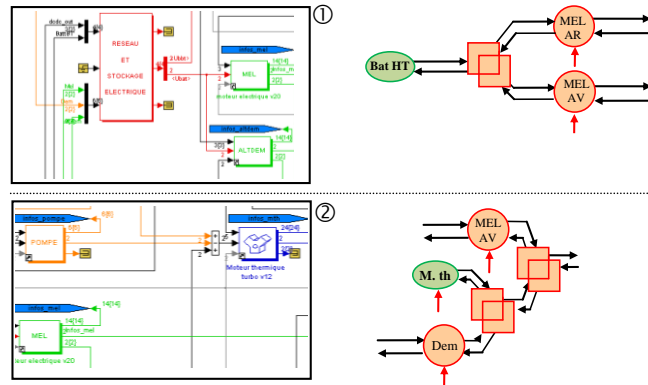


Figure 46 Mise en évidence des règles de couplage entre la REM et RepVHP dans Simulink, ① Exemple de couplage interne, ② exemple de couplage externe

L'embrayage – La REM, étant une représentation fonctionnelle, permet de mettre en avant les variables d'état (Figure 47). On voit très facilement que, lorsque l'embrayage est fermé, il n'y a qu'une seule inertie équivalente. A l'opposé, si l'embrayage est ouvert ou patine, deux inerties de part et d'autre de l'arbre sont à considérer [Lhomme 2006]. La représentation RepVHP en fait de même, mis à part que sous RepVHP cela n'est pas directement visible.

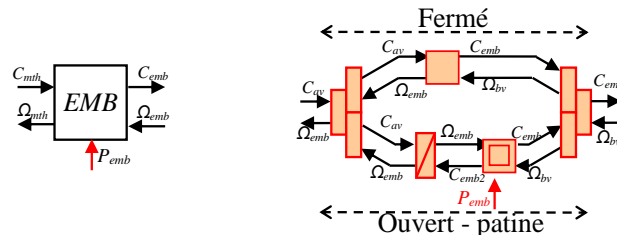


Figure 47 Comparaison de la représentation de l'embrayage et du crabot

Dans la REM, chaque inertie est symbolisée par un élément d'accumulation et donc, est très simple à identifier dans un système, ce qui n'est pas le cas de RepVHP. Dans les deux modélisations, les inerties sont ramenées au châssis du véhicule mais de deux manières différentes. En effet, sous RepVHP, toutes les inerties sont ramenées à l'élément terminal de la chaîne (qui peut être le châssis si l'embrayage est fermé ou le moteur thermique si l'embrayage est ouvert), en transitant avec la variable de flux (Figure 48) et en calculant au fur et à mesure l'inertie de l'arbre plus l'inertie précédente.

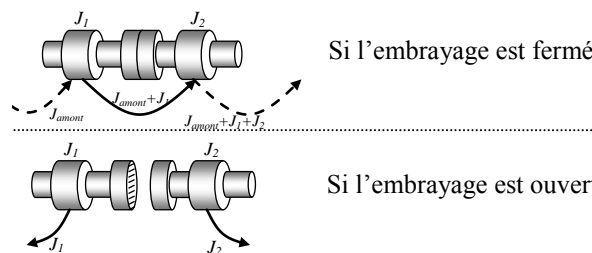


Figure 48 Prise en compte des inerties sous SimVHP

La représentation de l'inertie de l'arbre aval du crabot ou de l'embrayage et de l'inertie du véhicule engendrerait un problème d'association (Figure 49). L'utilisation de règles (permutation et concaténation) permet de résoudre ces problèmes d'association.

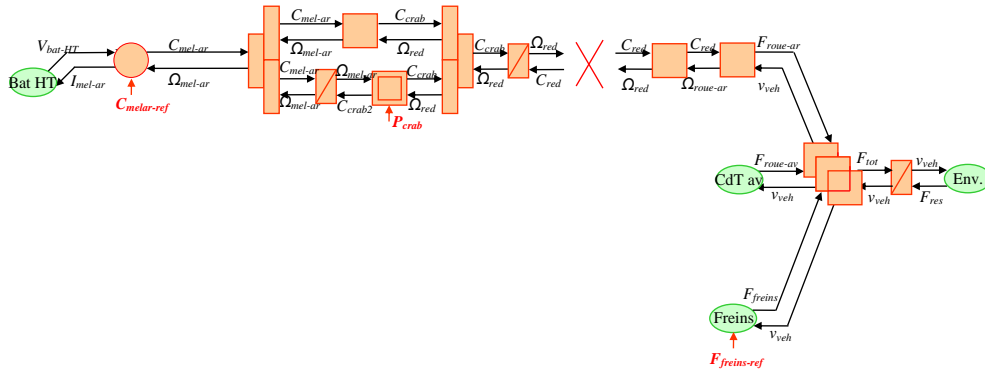


Figure 49 Mise en évidence des problèmes d'association

En REM, les inerties ne transitent pas avec la variable d'action comme dans SimVHP mais sont calculées « hors ligne » puis toutes les combinaisons possibles sont recensées (Tableau 2).

Hypothèse : la boîte de vitesse n'est au point mort que si l'embrayage est ouvert. Le découplage de la boîte de vitesse n'est donc pas pris en compte. Enfin, les différentes possibilités sont représentées par des éléments d'accumulation entre deux aiguilleurs permettant de faire le choix de la bonne inertie.

Tableau 2 Masse équivalente en fonction de la commande des différents organes

Embrayage	Crabot		Masse équivalente
0	0	①	$k_{bv}^2 R_{roue}^2 J_{EMB2} + k_{red}^2 R_{roue}^2 J_{CR2} + M_{veh}$
0	1	②	$R_{roue}^2 k_{bv}^2 J_{EMB2} + k_{red}^2 R_{roue}^2 J_{CR1} + M_{veh}$
1	0	③	$R_{roue}^2 k_{bv}^2 J_{EMB1} + k_{red}^2 R_{roue}^2 J_{CR2} + M_{veh}$
1	1	④	$R_{roue}^2 k_{bv}^2 J_{EMB1} + k_{red}^2 R_{roue}^2 J_{CR1} + M_{veh}$

0 : Élément ouvert ; 1 : Élément fermé

avec k_{bv} , le rapport de boîte de vitesse ; R_{roue} , le rayon de la roue ; k_{red} , le rapport de réduction du réducteur arrière ; J_{EMB1} et J_{EMB2} , l'inertie de l'arbre amont de l'embrayage lorsque que ce dernier est respectivement fermé ou ouvert ; J_{CR1} et J_{CR2} , l'inertie de l'arbre amont de l'embrayage lorsque que ce dernier est respectivement fermé ou ouvert ; M_{veh} , la masse du véhicule.

Le véhicule - La représentation du véhicule (Figure 50) met en avant le découplage des organes dans la REM comparé à RepVHP. Cela permet non seulement d'effectuer une commande composée de blocs simples, mais aussi de pouvoir ajouter certains phénomènes négligés auparavant. Ici, il serait par exemple possible de localiser rapidement l'élément à modifier si l'on veut ajouter le contact roue / route au niveau des roues [Verhille 2007a].

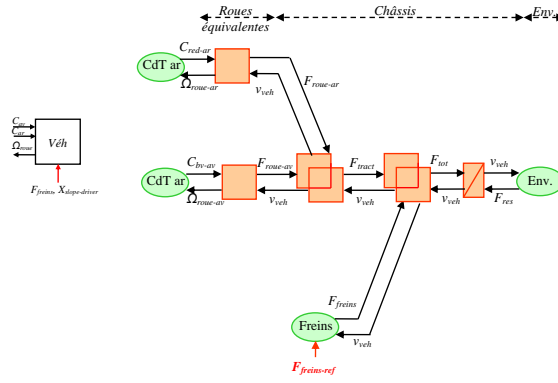


Figure 50 Comparaison de la représentation du véhicule

La modélisation du véhicule prend en compte plusieurs éléments : les roues, le châssis, etc. Le véhicule a trois fonctions : la première a pour objectif de calculer toutes les forces de résistance à l'avancement. Ces forces sont constituées de : la force aérodynamique (F_{aero}) (11), la force de résistance au roulement ($F_{res-roul}$), la force des freins (F_{freins}) et la force due à la pente (F_{pente}) (12).

$$F_{aero} = v_{veh}^2 0,5 \rho_{air} S C_x \quad (11)$$

$$F_{pente} = \sin\left(\arctan\left(\frac{X_{slope-driver}}{100}\right)\right) M_{veh} g \quad (12)$$

avec v_{veh} , la vitesse du véhicule ; ρ_{air} , la résistance de l'air ; S, la surface frontale du véhicule ; C_x , le coefficient de pénétration dans l'air du véhicule ; $X_{slope-driver}$, la pente de la route ; M_{veh} , la masse du véhicule ; g , l'accélération de la pesanteur.

L'énergie potentielle du véhicule est accumulée dans le châssis du véhicule : l'équation du principe fondamental de la dynamique est utilisée (13). La dernière fonction a pour objectif de concaténer tous les couples provenant des roues avant, des roues arrière et des freins mécaniques (14).

$$J_{eq} \frac{dv_{veh}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (13)$$

$$F_{tot} = F_{tract} + F_{freins} \text{ avec } F_{tract} = F_{roue-av} + F_{roue-ar} \quad (14)$$

La représentation de la chaîne de traction avant a donc été réalisée (Figure 51).

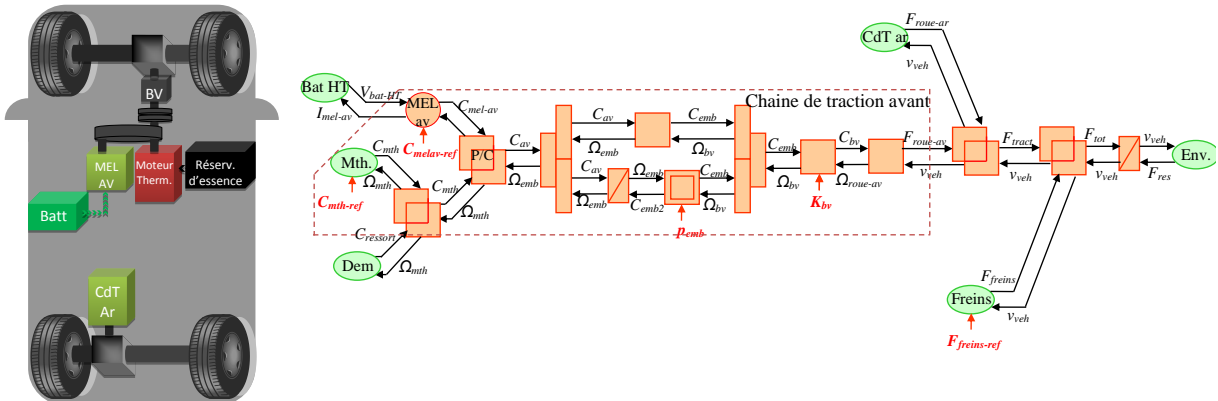


Figure 51 REM de la chaîne de traction avant

La « Chaîne de traction arrière » - Elle se compose de la machine électrique arrière, du crabot, d'un réducteur, du différentiel arrière et des roues.

Crabot – Le crabot est un élément physique dont la représentation fonctionnelle est identique à celle de l'embrayage. La différence de modélisation entre ces deux organes est la prise en compte ou non d'un glissement entre les deux mâchoires.

Réducteur – Le réducteur est un système d'engrenage dont le rapport de transmission est inférieur à 1. Il est représenté par un élément de conversion mono-physique (mécanique-mécanique).

Roue équivalente – Dans le but de simplifier la représentation, le différentiel mécanique ainsi que les deux roues ont été remplacés par une roue équivalente. Cette représentation est faite dans l'hypothèse où le cycle de test ne comporte aucun virage. Cette roue équivalente sera représentée par un élément de conversion mono-physique.

La REM globale de la chaîne de traction arrière est réalisée (Figure 52)

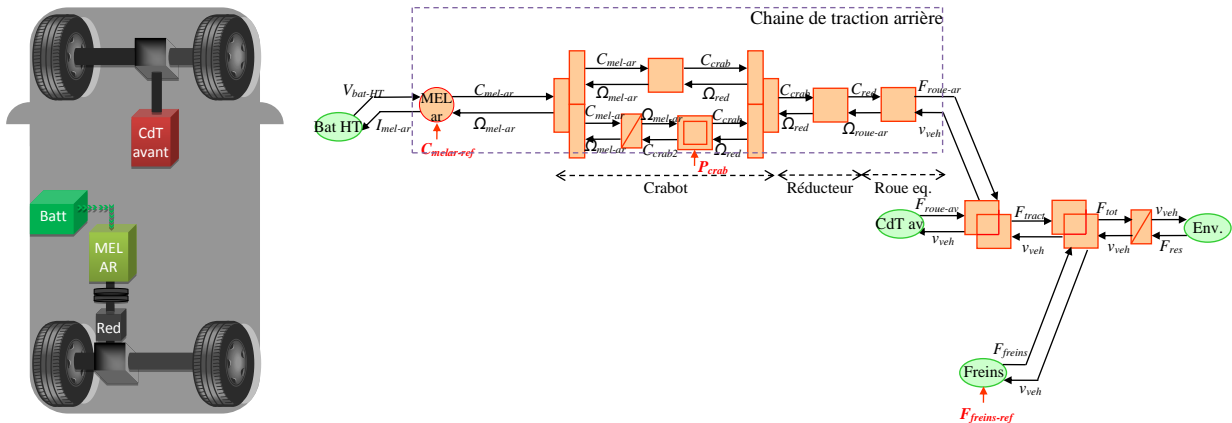


Figure 52 REM de la chaîne de traction arrière

En associant les différentes REM effectuées précédemment, nous obtenons la REM globale d'un véhicule hybride HYbrid4 (Figure 53).

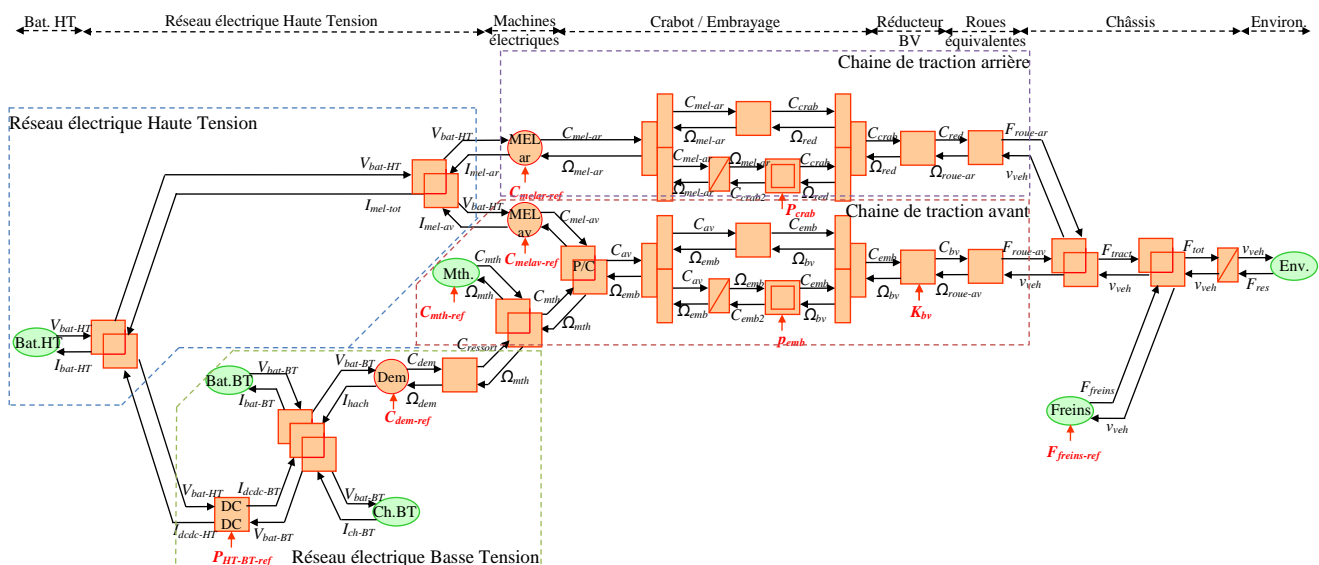


Figure 53 REM du véhicule étudié

II.3. Elaboration de la commande par inversion

Dans cette section, la commande basée sur l'inversion de la REM sera réalisée. Une première stratégie de gestion de l'énergie sera mise en place pour permettre de simuler les différents modes de fonctionnement et les différents flux énergétiques.

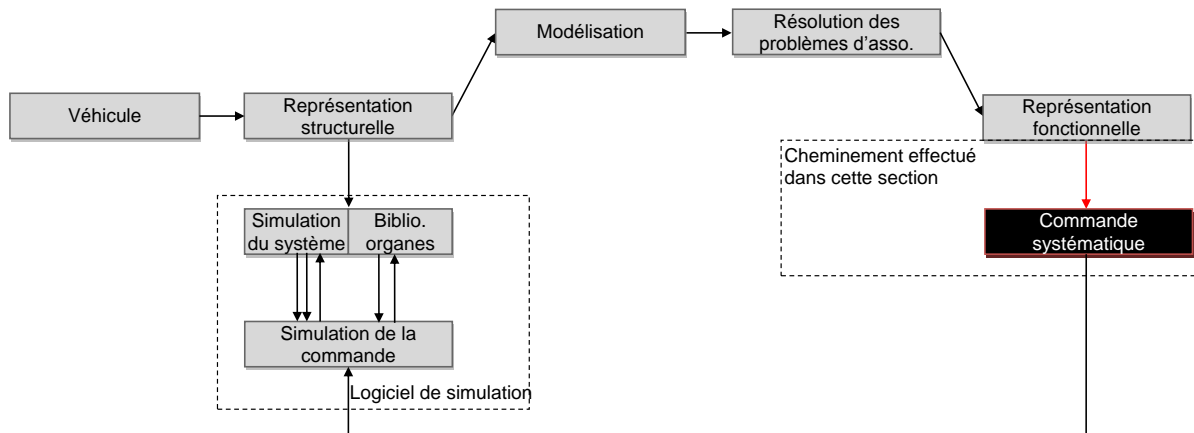


Figure 54 Approche Mixte de l'élaboration de la commande : Cheminement de cette section

II.3.a. Commande basée sur l'inversion de la REM

Différentes étapes sont requises pour déduire la structure de commande provenant des règles d'inversion de la REM (Annexe D) [Bouscayrol 2003]. Après la détermination de la REM, les différents objectifs (variables à contrôler) et les variables de réglages sont déduits du cahier des charges. Ensuite, une chaîne de réglage doit être définie. Une chaîne de réglage relie les entrées de réglages sur lesquelles on peut agir et les sorties à contrôler. Ensuite, l'inversion des éléments constituant cette chaîne de réglage permet d'obtenir la structure de commande. Les éléments sans accumulation d'énergie (relation atemporelle) peuvent être directement inversés (sans mesure obligatoire ni correcteur). Les éléments disposants d'une variable énergétique (éléments d'accumulation) ne peuvent pas directement être inversés, la causalité dérivée n'étant pas autorisée. Une inversion indirecte en utilisant un correcteur et des mesures est alors effectuée. L'inversion des éléments de couplage en REM permet en général de mettre en avant une entrée supplémentaire. Cette entrée permet de distribuer ou de pondérer les flux d'énergie entre plusieurs sous-systèmes connectés. Grâce à ces règles d'inversion les différents correcteurs et mesures sont ainsi mis en avant.

Dans cette section, la commande sera effectuée en suivant les règles d'inversion de la REM. La structure de commande de la partie étudiée du véhicule doit répondre à deux objectifs :

- le premier permettra de commander la tension de la batterie basse tension. Pour ce faire la commande du convertisseur DC/DC sera réalisée.

- le deuxième objectif est de commander la vitesse du véhicule pour cela des actions seront effectuées sur les Groupes Moto-Propulseurs (GMP). Certaines variables comme l'état de charge de la batterie seront à prendre en compte.

Commande de la tension de la batterie BT

Détermination de la chaîne de réglage - La valeur à contrôler est l'état de charge de la batterie basse tension et donc le courant qui en est extrait ou absorbé en fonction de la charge. Cette chaîne de réglage est élaborée grâce à la REM de la Figure 40. Pour agir sur cette grandeur, nous utilisons la puissance transitant entre le réseau haute tension et le réseau basse tension. Cette puissance correspond à l'entrée de commande du convertisseur DC / DC ($P_{HT-BT-ref}$) (Figure 55).

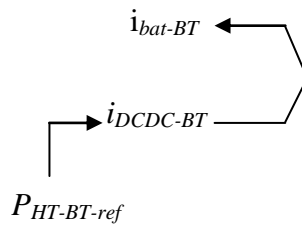


Figure 55 Chaîne de réglage de la tension de batterie Basse Tension

Elaboration de la structure de commande - Nous inversons ensuite chaque élément de cette chaîne de réglage pour obtenir la Structure Maximale de Commande (Figure 56).

Le premier élément à inverser est un élément de couplage (8). Il suffit donc d'inverser cette équation :

$$i_{DCDC-BT-ref} = i_{bat-BT-ref} - i_{hach-mes} - i_{ch-BT-mes} \quad (15)$$

L'inversion de cet élément nous montre que deux variables sont donc à mesurer ou estimer. Le deuxième élément à inverser est un élément de conversion correspondant au convertisseur DC/DC modélisé en statique (6) :

$$P_{HT-BT-ref} = -v_{bat-BT} \cdot i_{DCDC-BT} \quad (16)$$

avec $P_{HT-BT-ref}$ la consigne représentant la puissance transitant entre le réseau HT et BT.

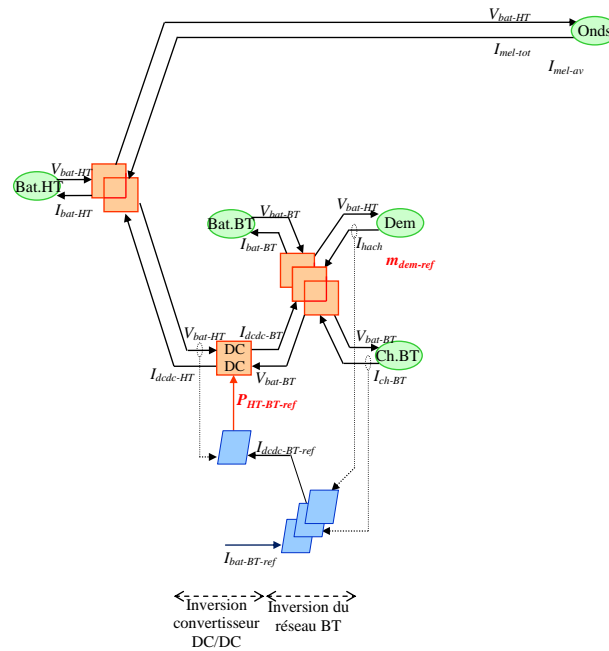


Figure 56 Structure Maximale de Commande de la tension de batterie

Commande de la vitesse du véhicule

Un véhicule hybride disposant d'une architecture type HYbrid4 dispose d'un embrayage permettant de changer les rapports de la boîte de vitesses et de découpler le GMP avant des roues. Un embrayage est un mécanisme non linéaire qui assure plusieurs positions. De ce fait, ces positions vont avoir un impact sur l'organisation de la commande. Une modélisation causale [Lhomme 2007 a] a été effectuée grâce à une représentation multi-modèle avec deux modèles distincts :

- Modèle 1 : embrayage bloqué. Ce modèle est utilisé pour un fonctionnement hybride ou thermique seul.
- Modèle 2 : embrayage patine (ou est ouvert). Ce modèle est employé quand le conducteur désire changer de rapport de la boîte de vitesses avec le moteur thermique en fonctionnement. Il peut être également utilisé quand le véhicule est à l'arrêt pour recharger les batteries grâce à la machine électrique avant.

Le GMP arrière, quant à lui, peut être considéré comme un véhicule électrique disposant d'un crabot. Ce dernier est représenté comme un embrayage sans avoir son aspect de glissement. Deux modèles sont donc aussi disponibles (Figure 52) :

- Modèle 1 : Crabot bloqué. Ce modèle est utilisé pour un fonctionnement électrique.
- Modèle 2 : Crabot ouvert. Ce modèle est utilisé dans de rares cas : particulièrement sur parcours extra-urbain, à une vitesse où la machine électrique arrière ne fournit plus de couple et ses pertes sont plus importantes.

La commande en vitesse du véhicule peut se faire par deux GMP différents. La commande des GMP, étant fortement dépendante des états des organes de découplage

(embrayage et crabot), est défini en fonction de ces organes. Quatre états sont donc étudiés en fonction des organes de découplage :

- état 1 : embrayage ouvert, crabot ouvert,
 - Objectifs : Ω_{emb} , Ω_{crab} , v_{veh} ,
 - Variables de réglage : $C_{melav-ref}$, $C_{mth-ref}$, $C_{melar-ref}$, $F_{freins-ref}$,
- état 2 : embrayage ouvert, crabot fermé,
 - Objectifs : Ω_{emb} , v_{veh} ,
 - Variables de réglage : $C_{melav-ref}$, $C_{mth-ref}$, $C_{melar-ref}$, $F_{freins-ref}$,
- état 3 : embrayage fermé, crabot ouvert,
 - Objectifs : Ω_{crab} , v_{veh} ,
 - Variables de réglage : $C_{melar-ref}$, $C_{melav-ref}$, $C_{mth-ref}$, $F_{freins-ref}$,
- état 4 : embrayage fermé, crabot fermé,
 - Objectifs : v_{veh} ,
 - Variables de réglage : $C_{melav-ref}$, $C_{mth-ref}$, $C_{melar-ref}$, $F_{freins-ref}$,

Définition des chaînes de réglage des 4 états – La première étape dans l'élaboration de la commande systématique est la recherche de la chaîne de réglage.

Etat 1 : embrayage ouvert, crabot ouvert – Lorsque l'embrayage et le crabot sont ouverts, les seules variables pouvant être commandées par les machines électrique et le moteur thermique sont les vitesses des arbres en aval des organes de découplage (Figure 57). Seuls les freins mécaniques permettent de contrôler la vitesse du véhicule. Lorsque l'embrayage est ouvert, les couples du moteur thermique et de la machine électrique avant permettent de contrôler la vitesse de ralenti du moteur thermique. Lorsque le crabot est ouvert, le couple de la machine électrique arrière permet de contrôler la vitesse de l'arbre en aval du crabot. Cette commande en vitesse n'est utilisée que lors des re-crabotages de la machine électrique arrière à vitesse non-nulle (synchronisation des arbres).

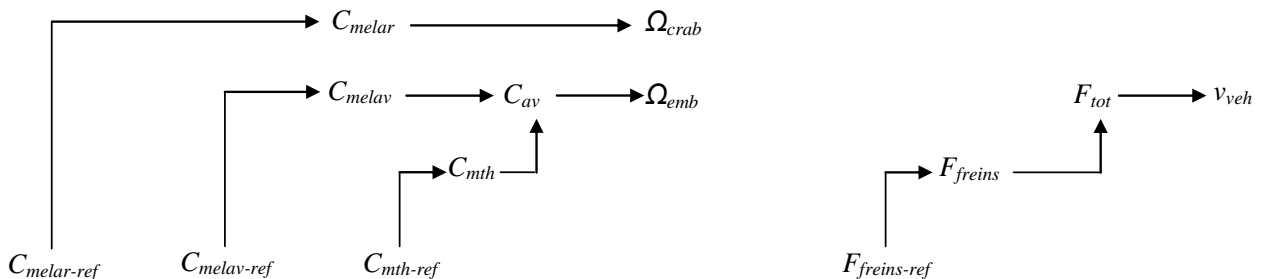


Figure 57 Chaîne de réglage de la vitesse lorsque l'embrayage et le crabot sont ouverts

Etat 2 : embrayage ouvert, crabot fermé – Lorsque l'embrayage est ouvert, la seule variable pouvant être commandées par la machine électrique avant et le moteur thermique est la vitesse de l'arbre en aval de l'embrayage. Lorsque le crabot est fermé, la machine électrique

arrière peut commander la vitesse du véhicule (Figure 58). Les freins mécaniques permettent aussi de contrôler la vitesse du véhicule.

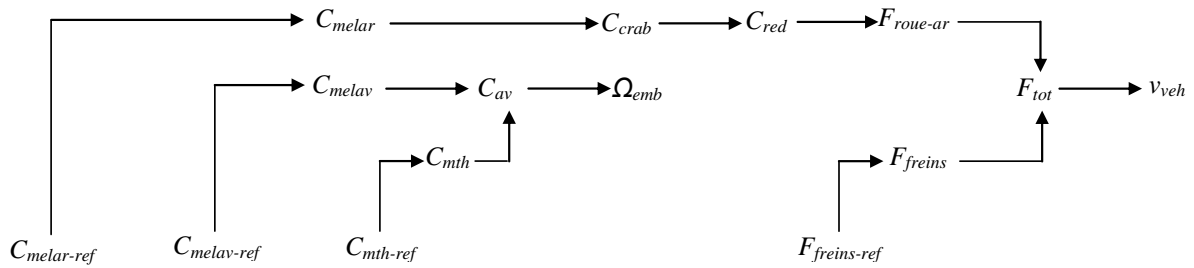


Figure 58 Chaîne de réglage de la vitesse lorsque l'embrayage est ouvert et lorsque le crabot est fermé

Etat 3 : embrayage fermé, crabot ouvert – Lorsque l'embrayage est fermé, la vitesse du véhicule peut être commandée par la machine électrique avant et le moteur thermique. Le crabot étant ouvert, la machine électrique arrière ne peut commander que la vitesse de l'arbre en amont du crabot (Figure 59). Les freins mécaniques permettent aussi de contrôler la vitesse du véhicule.

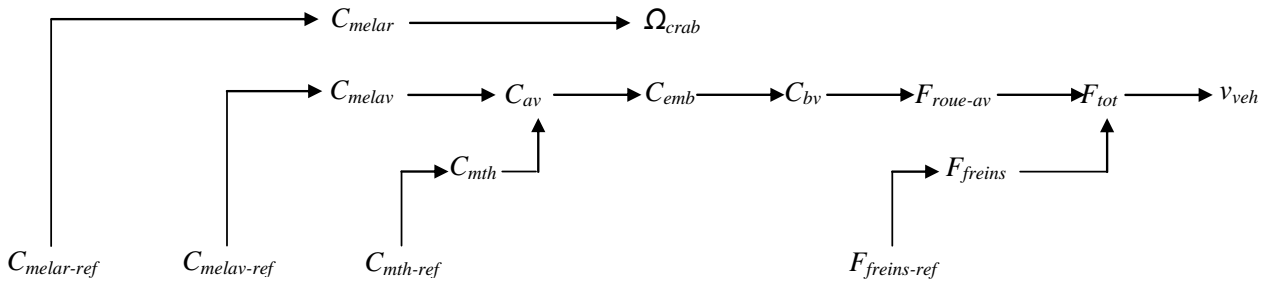


Figure 59 Chaîne de réglage de la vitesse lorsque l'embrayage est fermé et lorsque le crabot est ouvert

Etat 4 : embrayage fermé, crabot fermé – Lorsque l'embrayage et le crabot sont fermés, la vitesse du véhicule peut être commandée par les machines électriques avant et arrière et le moteur thermique (Figure 60). Les freins mécaniques permettent aussi de contrôler la vitesse du véhicule.

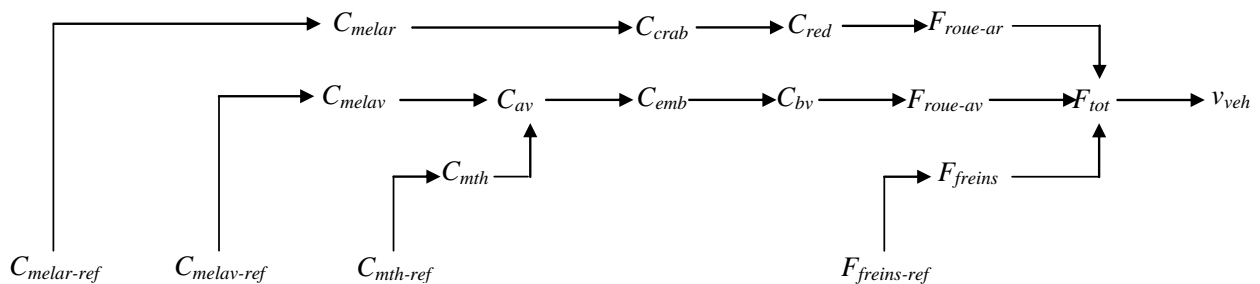


Figure 60 Chaîne de réglage de la vitesse lorsque l'embrayage et le crabot sont fermés

Inversion des chaînes de réglage – Chaque élément présent sur ces chaînes de réglage est ensuite inversé.

Inversion des éléments atemporels - Les éléments atemporels présents sur ces chaînes de réglages sont directement inversés : réducteur arrière(17), roues équivalentes arrières (18) et avant (19), boîte de vitesse avant (20).

$$C_{crab-ref} = k_{red} C_{red-ref} \quad (17)$$

$$C_{red-ref} = R_{roue} F_{roue-ar-ref} \quad (18)$$

$$C_{bv-ref} = R_{roue} F_{roue-av-ref} \quad (19)$$

$$C_{emb-ref} = k_{bv} C_{bv-ref} \quad (20)$$

Inversion des éléments de répartition - Trois éléments de répartition sont sur la chaîne de réglage : la répartition entre le moteur thermique et la machine électrique avant et la répartition entre les freins mécaniques, le GMP avant et le GMP arrière. En utilisant les règles d'inversion de la REM, trois entrées de répartition apparaissent permettant de définir la gestion d'énergie (21)(22).

$$\begin{cases} C_{melav-ref} = krep_{melav-mth} \cdot k_{cp} \cdot C_{av-ref} \\ C_{mth-ref} = (1 - krep_{melav-mth}) \cdot C_{av-ref} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} F_{roue-av-ref} = krep_{av-ar} F_{tract-ref} \\ F_{tract-ref} = (1 - krep_{av-ar}) F_{tract-ref} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} F_{freins-ref} = krep_{gmp-freins} F_{tot-ref} \\ F_{tract-ref} = (1 - krep_{gmp-freins}) F_{tot-ref} \end{cases} \quad (23)$$

avec $C_{melav-ref}$ le couple de référence de la machine électrique avant ; $C_{mth-ref}$ le couple de référence du moteur thermique ; $F_{freins-ref}$ la force de référence des freins ; $F_{roue-ar-ref}$ la force de référence des roues arrières ; $F_{roue-av-ref}$ la force de référence des roues avant ; $F_{tot-ref}$ la force de référence totale demandée au véhicule par le conducteur ; $krep_{av-ar}$ le facteur de répartition entre les GMP avant et arrière ; $krep_{gmp-freins}$ le facteur de répartition entre les GMP et les freins mécaniques ; $krep_{melav-mth}$ le facteur de répartition entre la machine électrique avant et le moteur thermique.

Inversion des éléments de commutation - Le travail de détermination de la commande d'une telle structure revient à identifier quels sont les commandes que l'on doit mettre en œuvre pour chaque modèle, ceci afin de gérer convenablement l'énergie entre le moteur thermique, la machine électrique et le véhicule.

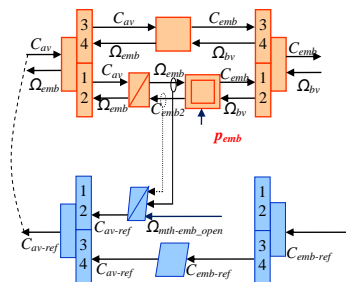


Figure 61 REM et structure de commande du véhicule HYbrid4

Lorsque l'élément de commutation est à l'état ouvert ou patinant, la SMC de ce sous-système a pour objectif de commander la vitesse angulaire Ω_{emb} . Elle sera asservie à la vitesse du ralenti à partir d'un correcteur, dont la vitesse de référence provient de la stratégie. En effet, si l'état de charge de la batterie est faible, il peut être nécessaire de demander au moteur thermique de fournir de la puissance à la batterie via la machine électrique avant et donc la vitesse sera supérieure à la vitesse de ralenti. Lorsque l'embrayage est ouvert, la vitesse du véhicule ne peut être que contrôlée par les freins mécaniques ou par le GMP arrière.

Lorsque l'élément de commutation est à l'état fermé, le couple disponible sur l'embrayage coté motorisation est également celui disponible côté transmission mécanique. Pour ce modèle, notons que selon la puissance demandée pour la traction du véhicule, la machine électrique pourra fonctionner en génératrice (fonctionnement flux série) ou en moteur (fonctionnement boost).

Commande du véhicule complet

Les 2 SMC effectuées sont rassemblées pour obtenir la commande globale (Figure 62). Les différents états discutés précédemment sont indiqués sur les aiguilleurs. Un point important de la REM est qu'elle permet de mettre en évidence les différents endroits où la stratégie de gestion de l'énergie doit agir :

- la répartition d'énergie entre les GMP avant et arrière et les freins mécaniques,
- la répartition d'énergie entre la machine électrique avant et le moteur thermique,
- le numéro de rapport de la boîte de vitesse (boîte de vitesse robotisée),
- la position du crabot,
- la position de l'embrayage (boîte de vitesse robotisée),
- les vitesses des arbres amonts lorsque l'embrayage et le crabot sont ouverts,
- le courant demandé à la batterie basse tension.

La boîte de vitesse étant robotisée, le rapport de la boîte de vitesses et la vitesse de référence du véhicule sont obtenus à partir de cycles normalisés. L'évolution de ces deux variables est censée reproduire la demande d'un conducteur.

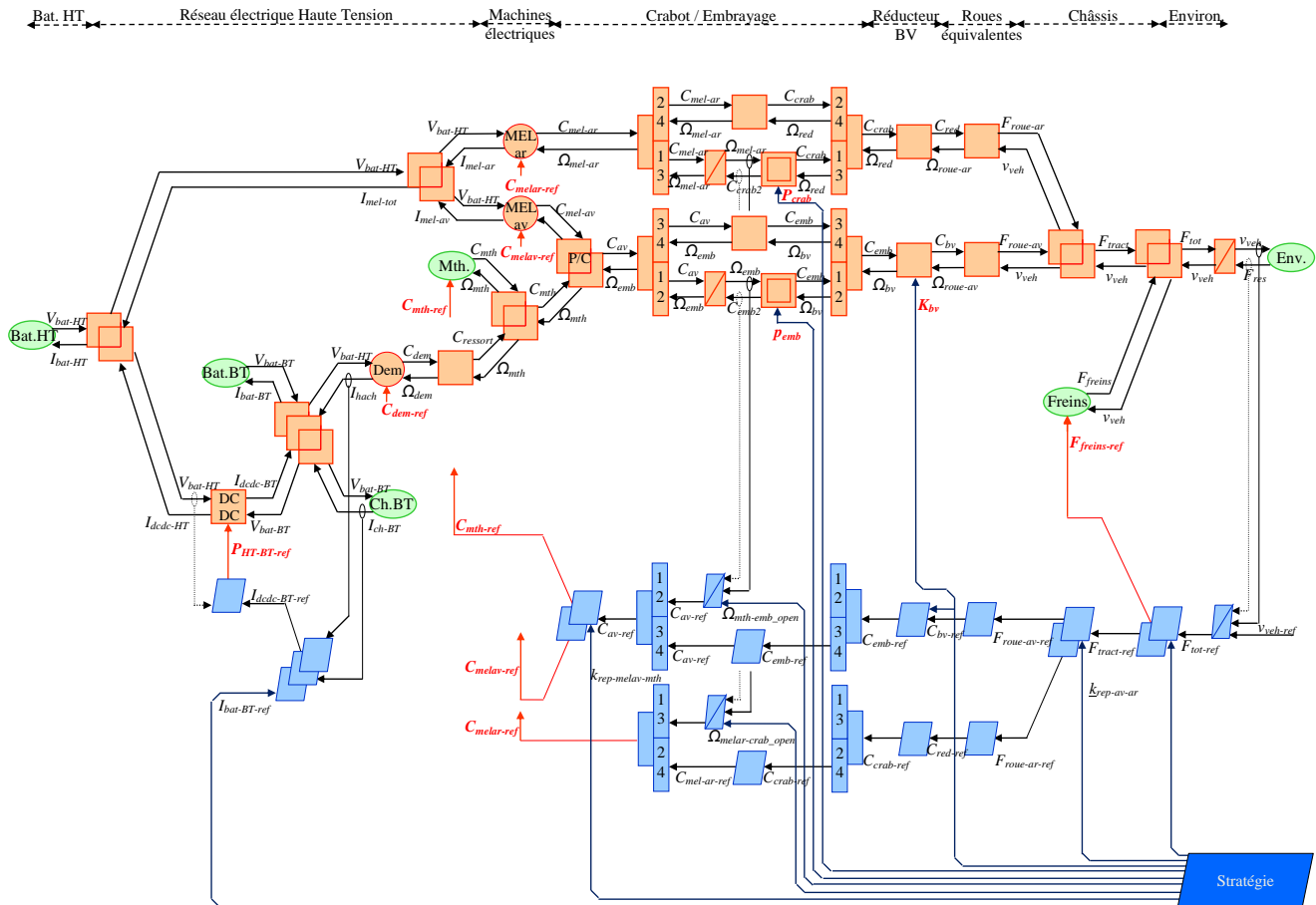
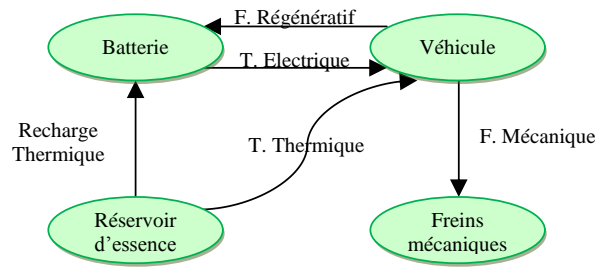


Figure 62 REM et structure de commande du véhicule HYbrid4

II.3.b. Stratégie de gestion de l'énergie

Pour tester la commande basée sur l'inversion, une première stratégie de gestion de l'énergie est mise en place. Les chaînes de réglages et les structures de commande associées dépendent naturellement de l'objectif de la stratégie et donc du mode de fonctionnement. Différentes définitions semblent importantes lorsque l'on veut structurer l'approche de l'élaboration d'une stratégie [Syed 2012] : mode de fonctionnement et flux énergétique.

Mode de fonctionnement - Un mode de fonctionnement est un chemin énergétique entre les différentes sources d'énergie. Les modes de fonctionnement dépendent donc exclusivement de la nature des sources (réversible ou pas) et de leur nombre (Figure 63). Dans le véhicule HYbrid4, les différentes sources considérées sont : le châssis du véhicule (source réversible), les freins (source irréversible), la batterie (source réversible), le réservoir d'essence (source non réversible).



T : Traction ; F : Freinage

Figure 63 Différents modes de fonctionnement [Syed 2012]

Différents modes de fonctionnement sont disponibles dans un véhicule hybride : freinage mécanique, traction thermique, charge interne de la batterie (via le moteur thermique), freinage régénératif, traction électrique. D'autres modes sont aussi possibles mais sont en fait considérés comme des combinaisons de ces modes « fondamentaux » : aide au démarrage (stop & start), assistance électrique (boost) ou traction hybride, freinage hybride, etc.

Pour cette stratégie de gestion de l'énergie, nous avons choisi d'activer les différents modes en fonction de l'état des différents éléments : état de charge de la batterie HT, des demandes du conducteur : force et vitesse de référence, mais aussi de différentes prestations que l'on voudrait fournir au client : utilisation de la machine électrique arrière pour les ruptures de couple lors des changements de rapport. Tous les modes de fonctionnement définies précédemment sont utilisés et sont activés suivant l'état des paramètres du système (loi heuristique) :

- Traction électrique : ce mode de fonctionnement utilise la batterie et la machine électrique arrière. Il est actif si le SoC de la batterie permet un fonctionnement en tout électrique ($SoC > SoC_{min}$), si la vitesse du véhicule est inférieure à la vitesse maximale en fonctionnement tout électrique ($v_{véh-mes} < v_{élec-max}$) et si le couple de référence est inférieur au couple maximal transmissible par la machine électrique arrière ($C_{ref} < C_{élec-max}$).
- Freinage régénératif : ce mode de fonctionnement utilise les machines électriques avant et arrière, et la batterie. Il est actif si le véhicule ralentit ou freine ($P_{véh} < 0$), que le moteur thermique soit en fonctionnement ou non et si l'état de charge de la batterie HT n'est pas au maximum ($SoC < SoC_{max}$).
- Aide au démarrage du moteur thermique (stop & start) : ce mode de fonctionnement utilise la machine électrique avant, le moteur thermique et la batterie. Il est actif si le couple de référence est supérieur au couple maximal transmissible par la machine électrique arrière ($C_{ref} > C_{élec-max}$) ou si la vitesse du véhicule dépasse la vitesse maximale en mode tout électrique ($v_{véh-mes} > v_{élec-max}$).

- **Traction thermique** : ce mode de fonctionnement n'utilise que le moteur thermique. Il est actif si le SoC de la batterie ne permet pas un fonctionnement en électrique seul ($SoC < SoC_{min}$), si la vitesse du véhicule dépasse la vitesse maximale en mode tout électrique ($v_{veh-mes} > v_{elec-max}$) et si le moteur thermique peut subvenir seul à la force demandée ($C_{ref} < C_{mth-max}$).
- **Assistance électrique (boost)** : ce mode de fonctionnement utilise la machine électrique arrière, la batterie et le moteur thermique. Il est actif si le SoC de la batterie permet le démarrage du moteur électrique arrière ($SoC > SoC_{min}$), si le moteur thermique est en fonctionnement et si le couple de référence est supérieur au couple maximal transmissible par le moteur thermique ($C_{ref} > C_{mth-max}$).
- **Charge interne de la batterie (via le moteur thermique)** : ce mode de fonctionnement utilise le moteur thermique, la machine électrique avant et la batterie. Il est actif si le SoC de la batterie ne permet pas un fonctionnement en électrique seul ($SoC < SoC_{min}$) et si la vitesse du véhicule est nulle.
- **Freinage mécanique** : ce mode de fonctionnement n'utilise que les freins mécaniques de la voiture. Il est actif si le véhicule freine ($P_{veh} < 0$), si le SoC de la batterie a atteint sa valeur maximale ($SoC \geq SoC_{max}$) ou si la force de freinage électrique ne peut, à elle seule, freiner le véhicule.

Remarques : A ces modes de fonctionnement un autre peut être ajouté si le véhicule simulé est un véhicule hybride plug-in. En effet, le mode de fonctionnement « recharge externe de la batterie » serait alors disponible. A ces modes de fonctionnement de base peuvent s'ajouter des combinaisons entre chacune d'elles (ex : freinage hybride). En effet, il serait envisageable de contribuer à la consommation électrique de la machine électrique arrière (lors d'un fonctionnement en traction) via la machine électrique avant et le moteur thermique.

Flux d'énergie - Un flux d'énergie est le chemin emprunté par l'énergie pour effectuer le mode de fonctionnement sélectionné. Les flux d'énergie dépendent donc fortement de l'architecture du véhicule. Différents flux d'énergie possibles dans ce véhicule seront donnés pour justifier les choix qui ont été faits dans la recherche de la stratégie.

Pour un même mode de fonctionnement, plusieurs flux d'énergie peuvent être activés. Par exemple, pour la fonction « traction électrique », les flux énergétiques activés peuvent être : de la batterie à la machine électrique arrière, de la machine électrique arrière à la transmission mécanique, de la transmission mécanique à l'environnement.

De la même manière, un même flux d'énergie peut être activé par plusieurs fonctions différentes. Par exemple, le flux d'énergie « de la transmission mécanique à

l'environnement » sera activé par la traction mécanique, la traction thermique, l'assistance électrique, le freinage régénératif et le freinage mécanique.

Combinaisons mode de fonctionnement / flux d'énergie – Les différents flux d'énergie possibles pour chaque mode de fonctionnement sont maintenant expliqués. Les choix ainsi effectués pour l'élaboration de la stratégie sont explicités. Ces flux seront indiqués par les numéros définis sur la Figure 64. La REM étant un outil de description graphique basé sur les flux énergétiques il est facile de passer de la REM à un schéma simplifié permettant de recenser les différents flux possibles entre les éléments.

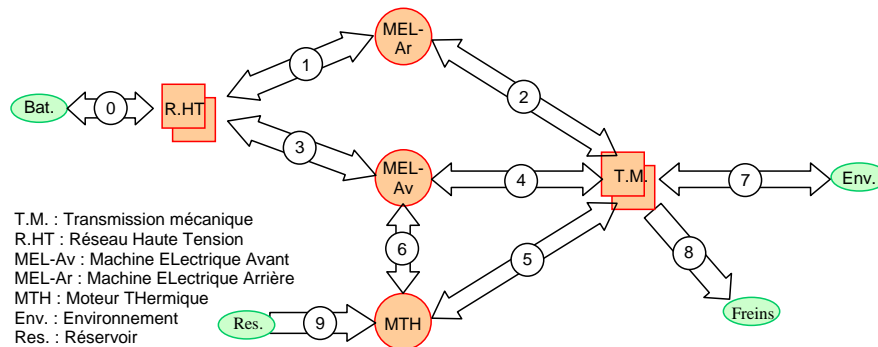


Figure 64 Recensement des différents flux énergétiques possibles entre les différentes sources

Le Tableau 3 recense une liste non exhaustive des différents flux d'énergie possibles pour chaque mode de fonctionnement. Parmi les différentes possibilités, certains choix sont fait : d'une part, les combinaisons des flux les plus intéressantes, d'autre part, un flux préférentiel pour une fonction donnée, afin de simplifier l'étude.

Tableau 3 Recensement des différents flux d'énergie possibles pour chaque mode de fonctionnement

Mode de fonctionnement	Flux d'énergie possible	Flux d'énergie préférentiel
<p>Freinage mécanique</p>		<p>Ce flux est le seul flux énergétique disponible dans cette fonction.</p>
<p>Traction thermique</p>		<p>Ce flux est le seul flux énergétique disponible dans cette fonction.</p>
<p>Charge de la batterie interne</p>		<p>Le flux préférentiel choisit dans le cas de la charge de la batterie interne est (9)→(6)→(3)→(0) car il diminue les pertes en ne devant pas obligatoirement contrer le couple résistant de la machine électrique arrière. De plus, utiliser ce flux permet la charge de la batterie en interne sans pour autant mouvoir le véhicule (embrayage ouvert).</p>
<p>Aide au démarrage</p>		<p>Le flux préférentiel choisit dans le cas de l'aide au démarrage est (0)→(3)→(6). En effet, ce flux permet, comme la charge de la batterie interne, de ne pas devoir « porter » la machine électrique avant. De plus, la machine électrique avant a été dimensionnée pour cette fonction.</p>
<p>Freinage régénératif</p>		<p>Dans le cas du freinage régénératif il n'y a pas de flux préférentiel. La récupération d'énergie pourra se faire par l'avant et / ou par l'arrière en fonction de l'état du moteur thermique. Si ce dernier est démarré (embrayage fermé) il est possible de récupérer de l'énergie via la machine électrique avant.</p>
<p>Assistance électrique</p>		<p>La fonction assistance électrique, comme dans le freinage régénératif, ne dispose pas de flux préférentiel mais, étant donnée la puissance de la machine arrière, il serait plus avantageux de n'utiliser que cette machine pour effectuer cette fonction.</p>
<p>Traction électrique</p>		<p>Le flux préférentiel de la fonction traction électrique est (1)→(2)→(7) car il permet de ne pas devoir contrer le couple de trainée du moteur thermique.</p>

II.4. Simulation mixte dans un logiciel fonctionnel

Dans cette section, le couplage entre la représentation structurelle implémentée dans un SimVHP et la commande issue de l'inversion de la REM sera réalisée. Pour cela, des interfaces permettant d'effectuer les adaptations des signaux provenant de la commande fonctionnelle vers la représentation structurelle seront expliquées. Plusieurs résultats de simulation seront ensuite donnés pour démontrer la faisabilité de cette démarche.

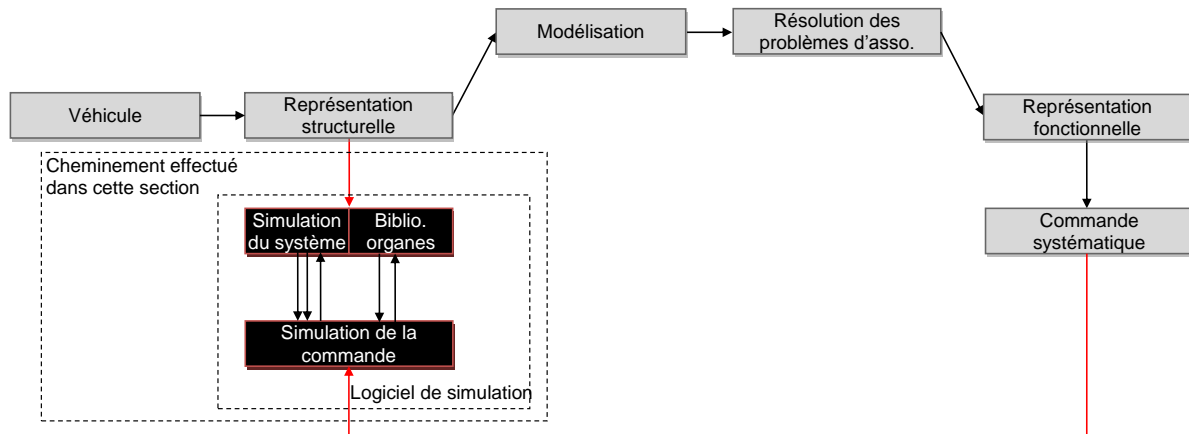


Figure 65 Approche Mixte de l'élaboration de la commande

II.4.a. Interface de couplage

L'objectif de cette partie est de réaliser le couplage entre la commande issue de la REM et SimVHP. Cela doit permettre à PSA Peugeot Citroën d'utiliser la commande par inversion issue de la REM dans leur logiciel à priorité structurelle. Pour cela, des éléments d'adaptation de signaux sont nécessaires au vu des informations demandées par les organes de SimVHP. Les différentes étapes jusqu'au couplage entre la représentation RepVHP et la commande basée sur l'inversion de la REM sont expliquées.

Couplage de RepVHP et de la Commande basée sur l'inversion de la REM

Dans le but de coupler la commande issue de la REM et RepVHP, des interfaces d'adaptation permettant de modifier les signaux de commande sont nécessaires.

Intérêt des interfaces d'adaptation - Dans notre étude, lorsque l'on veut connecter la commande issue de la REM à la représentation RepVHP, une interface d'adaptation est nécessaire. L'implantation de la représentation structurelle dans un logiciel de simulation à priorité fonctionnelle oblige les différents éléments à être utilisables indépendamment de l'architecture où ils sont utilisés. C'est pourquoi la Figure 66 montre que la simulation SimVHP, composée de RepVHP et de la Supervision PSA, dispose de deux interfaces d'adaptation : la première est liée à la représentation, la deuxième à la supervision. De plus, sous RepVHP, les entrées de commande ne le sont pas toujours mais sont plus proches d'être des passages de paramètres qu'une réelle commande.

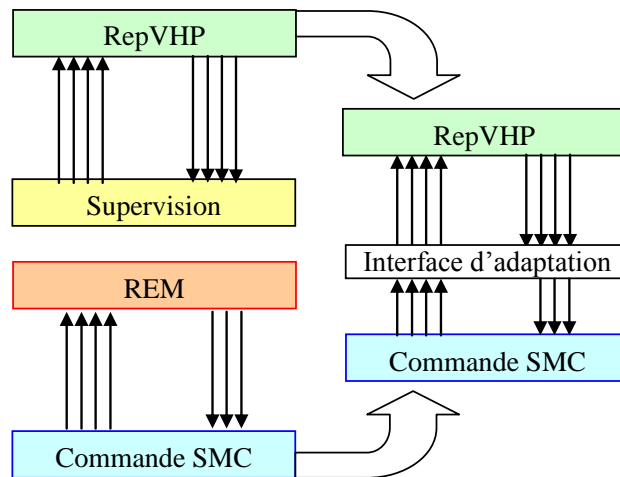


Figure 66 Illustration de la nécessité de l'adaptation

Par exemple, la commande des machines électriques (Figure 67) est d'abord calculée en couple de référence dans la supervision, puis toujours dans cette supervision, une adaptation est effectuée et ce couple de référence est transformé en une plage de 0 à 1, 0 représentant le couple min et 1 le couple max.

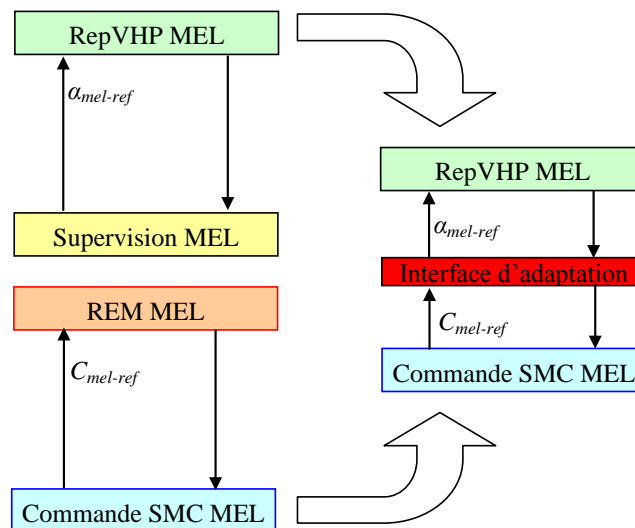


Figure 67 Illustration de la nécessité de l'adaptation

Le Tableau 4 liste les entrées de commande des organes dans les deux représentations. Ce dernier met en avant les entrées qui devront être adaptées (ex : le rapport de modulation du DC/DC, les commandes en couple des moteurs...), celles qui ne sont pas présentes et qui seront négligées (ex : la température des moteurs, le coefficient de lubrification de l'embrayage...) et enfin celles qui ne seront pas modifiées (ex : la commande de marche arrêt des moteurs, le numéro de rapport de la boîte de vitesse avant...).

Tableau 4 : Liste des entrées de commande des organes et comparaison entre les représentations

	RepVHP	REM	
DC/DC	$P_{HTBT-ref}$	$P_{HTBT-ref}$	
MEL_AR	α_{mel}	C_{mel}	①
	MA_{mel}	MA_{mel}	
	$T^{\circ}K$	---	
MEL_AV	α_{mel}	C_{mel}	①
	MA_{mel}	MA_{mel}	
	$T^{\circ}K$	---	
MTH	α_{mth}	α_{mth}	
	Injection	Injection	
	MA_{mth}	MA_{mth}	
	Consigne_ralenti	Consigne_ralenti	
	Consigne_PL	---	
EMB	P_{emb}	P_{emb}	②
	Q_{lub}	---	
CRABOT	P_{crabot}	P_{crabot}	②
BV	Num_rapport	Num_rapport	
	Neutre	Neutre	
VEHICULE	F_{frein}	F_{frein}	
	X_{slope}	---	

Est disponible et ne nécessite pas d'adaptation
 Nécessite une adaptation
 N'est pas disponible et sera négligé

① **La consigne de couple des machines électriques** - La différence entre les consignes données à la REM et à la RepVHP a été expliquée précédemment. Pour passer d'un couple de référence ($C_{mel-ref}$) à une plage de référence de 0 à 1 (α_{mel}), 0 représentant le couple minimum et 1 le couple maximum, il suffit de diviser le couple de référence par le couple maximal (ou minimal disponible) (24).

$$\alpha_{mel} = \frac{C_{mel-ref} - C_{mel-min}}{C_{mel-max} - C_{mel-min}} \tag{24}$$

avec $C_{mel-max}$ et $C_{mel-min}$, les couples maximum (ou minimum) de la machine électrique.

② **La consigne de position de l'embrayage et du crabot** - La différence entre les consignes données à la REM et à RepVHP est double. En effet, la première différence est la prise en compte, sous REM, de la non-linéarité lors du couplage de l'embrayage (Figure 68). La deuxième différence provient de la forme du signal de consigne indiquant position de l'embrayage (X_{cltch}). En effet, P_{emb} est l'opposé de X_{cltch} (25).

$$P_{emb} = \overline{X_{cltch}} \tag{25}$$

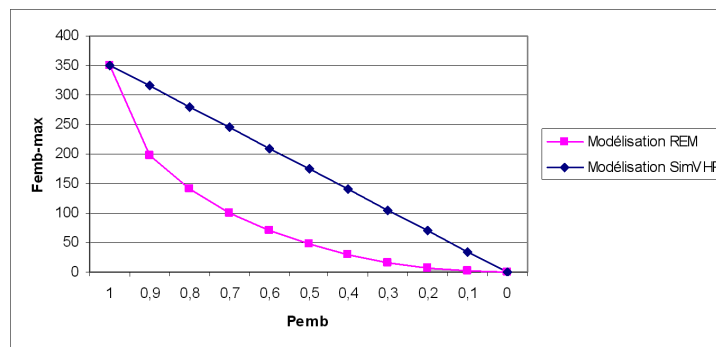


Figure 68 Prise en compte de la non-linéarité lors du couplage de l'embrayage

II.4.b. Résultats de simulation

La validation de la portabilité de la commande issue de la REM dans le logiciel SimVHP s'est faite sur un cycle NEDC modifié : au lieu d'avoir 4 cycles ECE-15 (cycle urbain) suivi d'un cycle EUDC (cycle autoroutier), un seul cycle ECE-15 sera utilisé. Le

programme de simulation ainsi réalisé est disponible Figure 69 en utilisant la stratégie de gestion de l'énergie proposée précédemment.

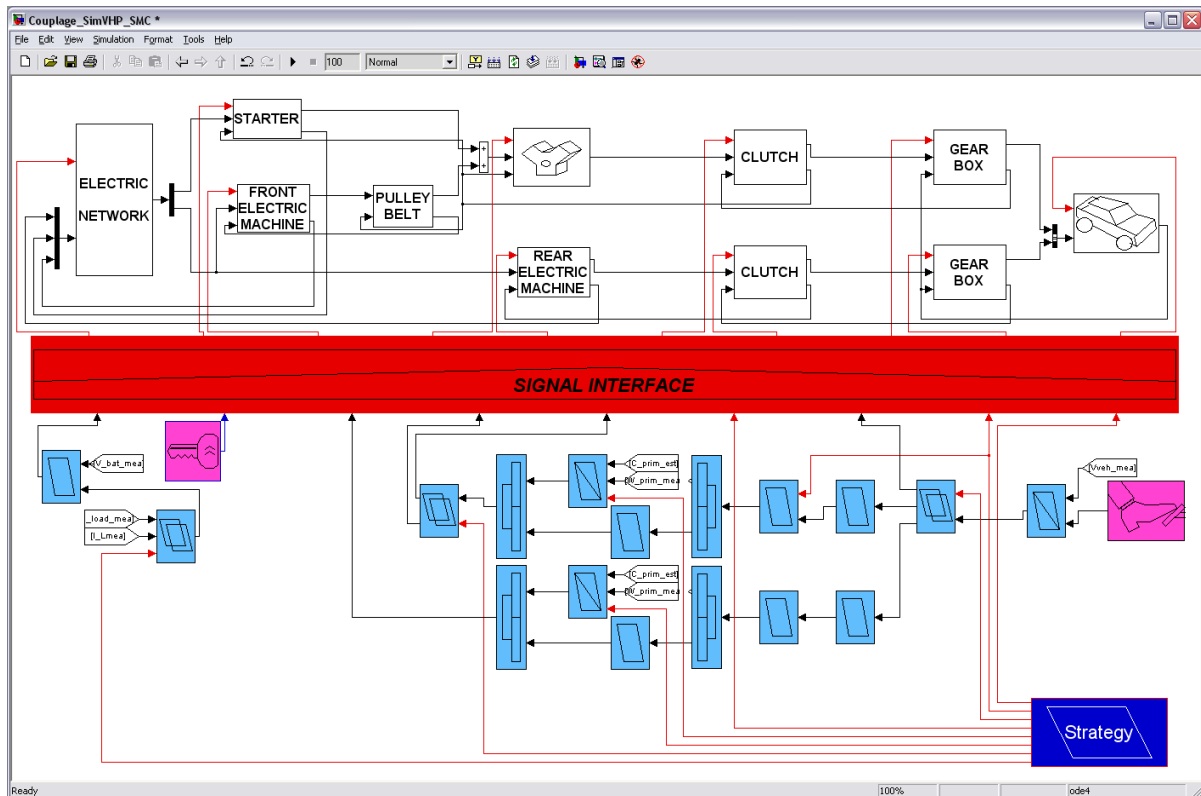


Figure 69 Programme de simulation du couplage entre RepVHP et de la commande issue de la REM

Sur les résultats de simulation de la partie mécanique (Figure 70), les différentes variables sont montrées :

- les couples des machines électriques, respectivement C_{mel-av} et C_{mel-ar} pour les machines électriques avant et arrière,
- le couple du moteur thermique C_{mth} ,
- la position des organes de découplage, respectivement P_{emb} et P_{crab} , pour l'embrayage et le crabot,
- la vitesse de la machine électrique arrière (Ω_{mel-ar}) et du moteur thermique (Ω_{mth}).

Toutes ces variables dépendent du mode de fonctionnement choisi par la stratégie :

- lorsque Mode=2 : le véhicule effectue un freinage régénératif (couple négatif sur la machine électrique arrière). La batterie HT est donc rechargée.
- lorsque Mode=3 : le véhicule fonctionne en mode tout électrique. Seule la machine électrique arrière subvient aux demandes de couple du conducteur. Ce mode peut aussi être activé dans le cadre d'un changement de rapport. En effet, lorsque le véhicule est en mode tout thermique et qu'une demande de changement de rapport est effectuée, pour éviter les ruptures de couple dû à l'ouverture (ou au patinage) de l'embrayage, la

machine électrique arrière va assurer le couple lorsque l’embrayage sera ouvert. Le moteur thermique prendra le relai une fois le rapport passé et l’embrayage refermé.

- lorsque Mode=5 : le véhicule fonctionne en tout thermique. Seul le moteur thermique assure les demandes de couple du conducteur.
- Mode=7 : le véhicule est en mode charge au point neutre. Lors de ce mode, la machine électrique avant va jouer, tout d’abord, son rôle d’alternodémarreur en lançant le moteur thermique à la vitesse de recharge. Le moteur thermique va ensuite fournir du couple à la machine électrique avant, embrayage ouvert, et la machine électrique avant fournira un courant négatif qui rechargera la batterie.

La Figure 71 montre les résultats de simulation sur les consommations, électrique ou mécanique, du véhicule :

- la première commande effectuée a pour objectif de commander le courant fourni par la batterie basse tension. Ce courant doit être nul en fonctionnement normal (tension U_{bat-bt} et état de charge SoC_{bat-bt} constants). La totalité du courant doit provenir de la batterie haute tension par l’intermédiaire du convertisseur DC/DC. Le courant en provenance de la batterie haute tension ($I_{dc-dc-HT}$) fluctue naturellement en fonction de la tension de la batterie basse tension.
- Lors des différents appels de courant de la machines électrique arrière (I_{mel-ar}) la décharge de la batterie haute tension est bien visible. Lors des freinages régénératifs, l’augmentation de l’état de charge est aussi visible.
- lorsque $t=30s$, l’état de charge à l’arrêt est considéré par la stratégie comme trop bas, un mode de recharge à l’arrêt via la machine électrique avant sera donc effectué. Dans un premier temps, la machine électrique allumera le moteur thermique. Puis ce dernier stabilisera la vitesse et la puissance nécessaire à la machine électrique pour recharger la batterie.
- La consommation en carburant du moteur thermique est également montrée. Cette consommation augmente lorsque le moteur thermique est sollicité.

La commande basée sur l’inversion de la REM a permis de bien gérer le système. En effet, tous les modes de fonctionnement possibles ont été effectués lors de cette simulation en gardant la même structure de commande. L’utilisation des règles d’inversion a été d’une grande aide dans la mise en évidence des différentes entrées de décision. Entrées sur lesquelles la stratégie, choisissant le mode de fonctionnement, doit agir.

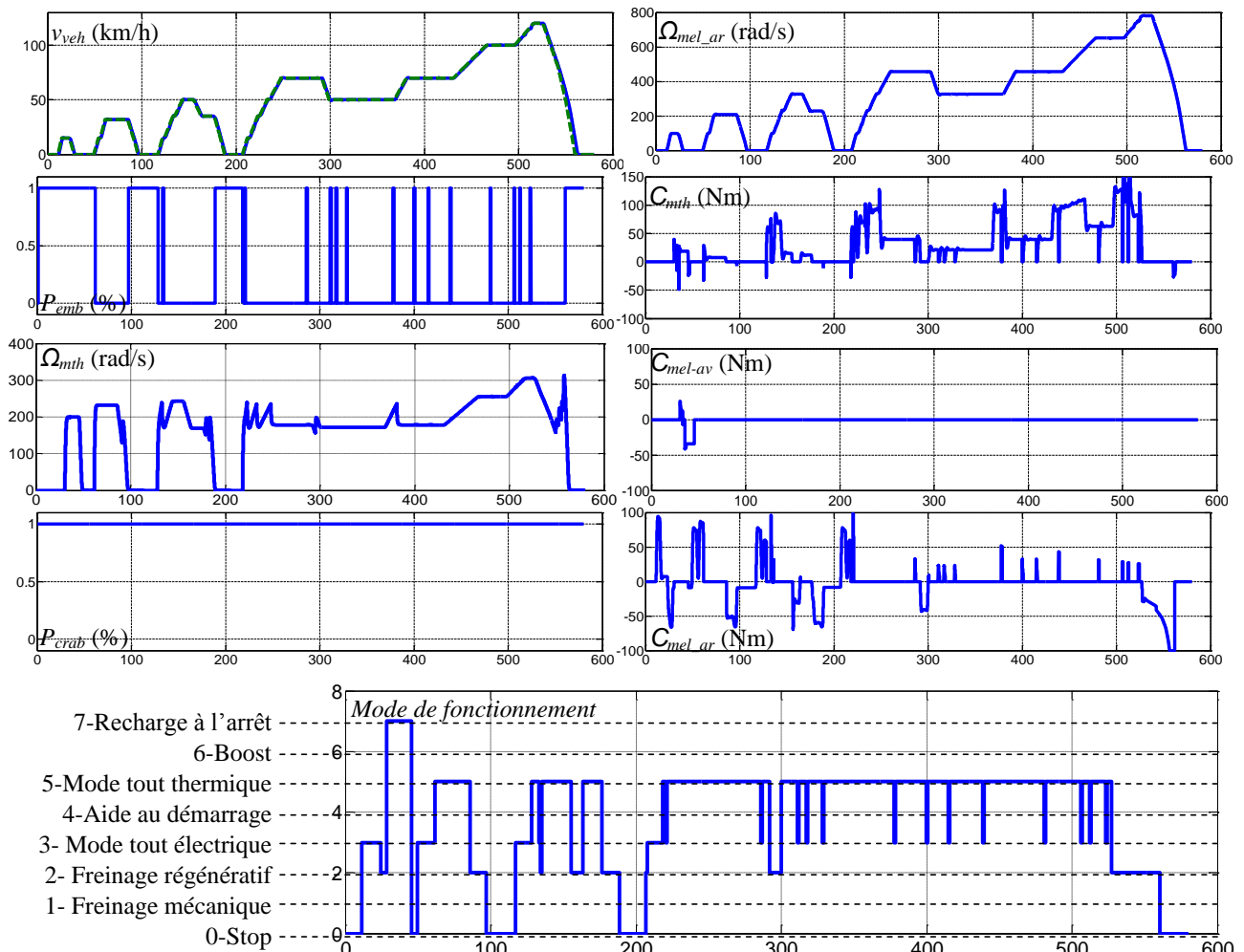


Figure 70 Résultats mécaniques de simulation du couplage entre SimVHP et de la commande issue de la REM

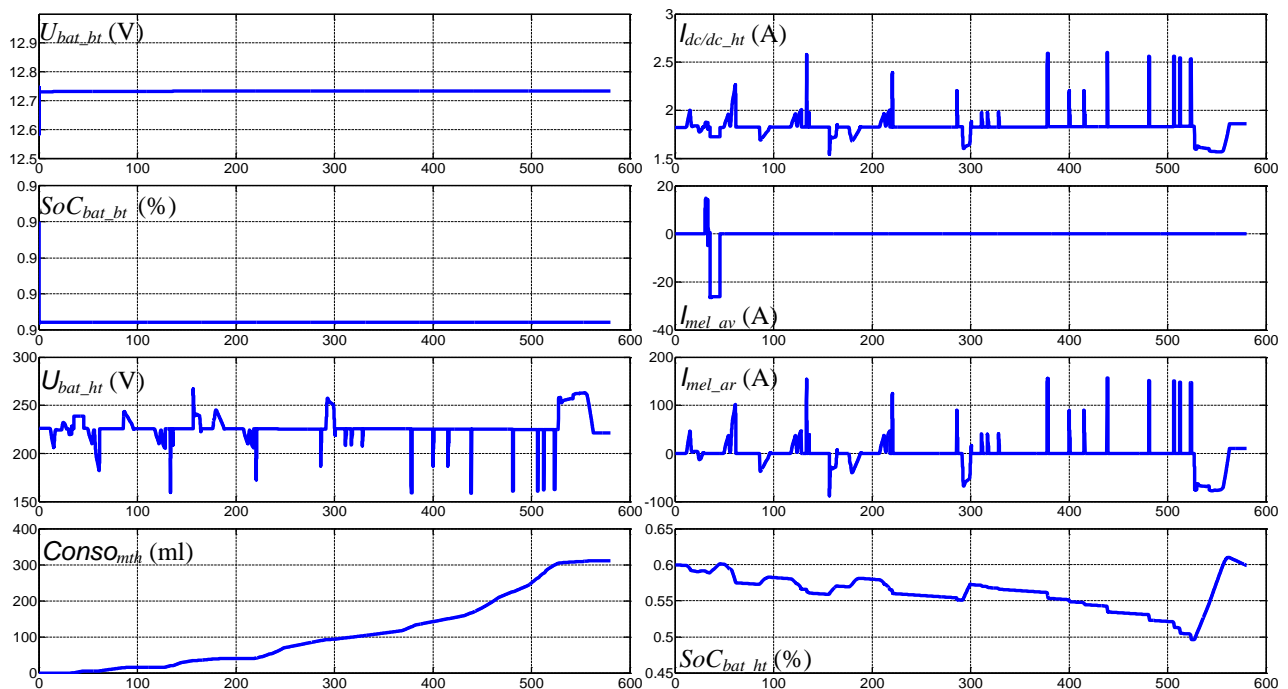


Figure 71 Résultats électriques de simulation du couplage entre SimVHP et de la commande issue de la REM

II.5. Conclusion

Ce deuxième chapitre a permis d'élaborer systématiquement la structure de la commande au travers la REM d'un véhicule Hybrid4. L'intérêt d'une telle approche a été démontré dans le chapitre 1.

Dans ce chapitre, plusieurs approches pour l'élaboration de la simulation d'un système ont été comparées. L'approche structurelle, très utilisée dans l'industrie y compris chez PSA Peugeot Citroën, permet de simuler très rapidement le système au travers de bibliothèques de composants. Dans le département de la recherche et de l'innovation de PSA Peugeot Citroën, l'outil de simulation ainsi utilisé se nomme SimVHP. L'avantage principal de cet outil est de permettre la mise en commun des différents modèles par différents métiers et de pouvoir construire, tester et dimensionner rapidement un système étudié. L'inconvénient de cette première approche est son lien avec la commande. En effet, pour effectuer une commande qui puisse être systématiquement déduite d'une représentation, une deuxième approche est mise en place. Une approche fonctionnelle peut se faire via l'utilisation d'outil tel que la REM. La REM est un outil de représentation fonctionnelle permettant de déduire une structure de commande en utilisant des règles d'inversion de modèle. L'inconvénient de cette approche est que la représentation puis la simulation ne peuvent être faite sans étude préalable du système permettant de résoudre les différents conflits d'association.

L'intérêt industriel est de pouvoir garder son outil de simulation structurelle : SimVHP avec toute sa richesse et de pouvoir le coupler avec une commande déduite systématiquement. La REM a alors été utilisée comme étape intermédiaire. La représentation structurelle SimVHP a d'abord été traduite en REM ; une commande systématique a ensuite été déduite ; une adaptation a enfin été rajoutée pour que cette commande soit applicable sur SimVHP. Ce couplage de méthodes a été validé par des résultats de simulation. L'intérêt de coupler l'utilisation de deux représentations (structurelle et fonctionnelle) est de garder une vision topologique du système tout en bénéficiant de l'aspect fonctionnel utilisé pour déduire de manière systématique la commande. Une simulation du véhicule HYbrid4 a été réalisée dans ce sens et a démontrée l'intérêt de ce couplage.

Nous allons voir, de plus, dans les chapitres suivants, comment cette commande est transposable directement en temps réel sur une plateforme d'expérimentation et sur un prototype.

Chapitre 3 : Emulation temps réel d'un véhicule hybride type HYbrid4

Résumé du chapitre 3

Le chapitre précédent a permis, à partir d'une représentation structurelle, de définir une structure de commande systématique. Cette structure de commande sera, dans ce chapitre, testée en temps réel sur deux plateformes de « Hardware-In-the-Loop (HIL) simulation » (Figure 72). Les « simulations HIL » réalisées dans ce chapitre seront de type puissance. La première plateforme HIL permettra d'effectuer une émulation temps réel à échelle réduite. La deuxième plateforme HIL permettra d'effectuer une émulation temps réel pleine échelle. Après la mise en place des définitions importantes utilisées dans ce chapitre, les avantages et inconvénients des deux émulations ainsi que les différents découpages possibles pour cette application en fonction des objectifs seront expliqués.

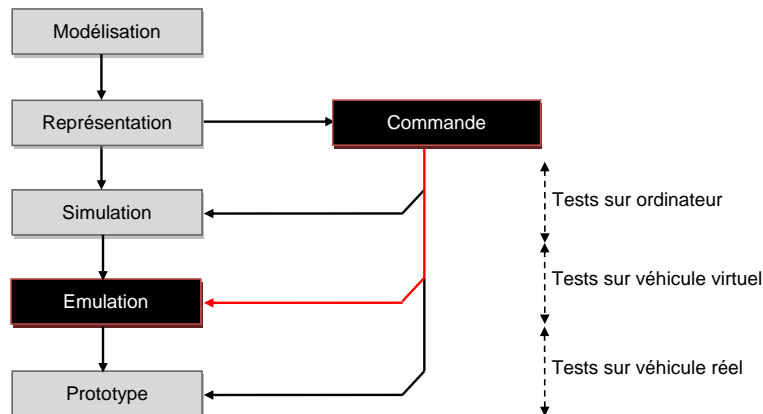


Figure 72 Schématisation de la partie testée dans ce chapitre

Plan du chapitre 3

III.1. Généralités sur l'émulation temps réel	72
III.1.a. Principes de l'émulation temps réel	72
III.1.b. Différentes échelles d'émulation	76
III.1.c. Démarche proposée	78
III.2. Emulation à échelle réduite	79
III.2.a. Réalisation de la « simulation HIL »	79
III.2.b. Résultats d'expérimentation	92
III.3. Emulation à pleine échelle	96
III.3.a. Réalisation de la « simulation HIL »	96
III.3.b. Résultats d'expérimentation	98
III.4. Conclusion	101

III.1. Généralités sur l'émulation temps réel

III.1.a. Principes de l'émulation temps réel

Généralités sur la « simulation HIL » - L'anglicisme «HIL simulation» (Hardware-In-the-Loop) est un terme couramment utilisé dans le langage scientifique pour définir l'incorporation d'une partie physique dans une boucle de simulation. Afin de faciliter la lecture de cet ouvrage le terme « simulation HIL » sera utilisé. L'émulation temps réel ou « Hardware-In-the-Loop » simulation a été utilisée pour répondre à la demande de tests des différents calculateurs présents dans les nouveaux véhicules. En effet, depuis les années 1990 [Maclay 1997], avec l'augmentation du nombre de calculateurs et la complexification des réseaux embarqués, le test des calculateurs hors-ligne avant implantation sur véhicule, est devenu primordial. Tout d'abord utilisé dans le domaine de l'aérospatial, pour des raisons évidentes de sécurité, le test des calculateurs hors ligne, dans des domaines où le nombre de calculateurs est en constante augmentation [Pouget 2012], est devenu nécessaire.

De nombreuses entreprises, telles que Opal-RT Technologies inc. [Rabbath 2002], dSPACE [Wagener 2007], ont alors commencé à livrer des solutions, dites clé-en-main, permettant le test de ces différents calculateurs. Au vu de la complexification des systèmes de traction, le test unique de la partie « signal » est apparu comme une première étape. Mais le test de la partie « puissance » est lui aussi devenu important [Terwiesch 1999] [Gauchia 2010] [Jin-Hong 2010]. Avec l'apparition de ces nouvelles étapes dans l'élaboration de nouveaux véhicules, de nouvelles appellations ont vu le jour. Le terme MIL [Cakmakci 2011] pour Model-In-the-Loop est parfois utilisé pour représenter une simulation effectuée sur ordinateur. D'autres termes augmentent la confusion dans leurs définitions. Le terme SIL [Demers 2007] pour Software-In-the-Loop peut porter à confusion. En effet, le terme « software » désigne selon la traduction un logiciel ou un programme. De fait, l'étape dite SIL correspond au test de la commande traduite en langage de programmation dans un logiciel de simulation. Le dernier terme utilisé est PIL [Liu 2007] pour Processor-In-the-Loop. Cette étape permet le test de la commande élaborée dans un calculateur prototype, le système étudié étant complètement émulé. Cette étape est analogue à ce que l'on définira par la suite comme HIL Signal. Le terme « HIL (Hardware-In-the-Loop) simulation » englobe parfois dans ces définitions l'incorporation d'une partie « puissance » dans la boucle de simulation, une extension des premières «simulations HIL».

La multiplication de ces appellations peut être intéressante dans le sens où les industriels peuvent donner des noms à différentes étapes effectuées. Cependant, cette multiplication de terminologie induit aussi une certaine confusion. Dans cette thèse, seules quelques appellations seront conservées. Ces dernières sont assez proches des définitions

initiées par dSPACE [Aksas 2006] : « signal level HIL », « electric power level HIL », « mechanical level HIL ». Suite à différentes sessions internationales, les appellations qui ont été choisies sont celles définies dans [Bouscayrol 2010 b] : HIL type signal, HIL type puissance.

Pour présenter ce qu'est la «simulation HIL», une comparaison entre la simulation sur ordinateur et la «simulation HIL» est présentée. Ensuite, les différents types de «Simulation HIL» sont présentés. Enfin, l'exemple de la «simulation HIL» d'un entraînement électrique est expliqué.

Simulation sur ordinateur et «simulation HIL» - Une simulation sur ordinateur est utilisée pour tester les dynamiques principales du système étudié et de sa commande associée. Le système étudié et sa commande sont tous les deux dans le même environnement de simulation mais peuvent fonctionner à des fréquences de calcul différentes (Figure 73). La simulation n'est composée que de modèles, toutes les variables transitant entre les sous-systèmes ne sont que des signaux. Un algorithme de commande fonctionnant à la même fréquence que l'environnement de simulation est aussi présent.

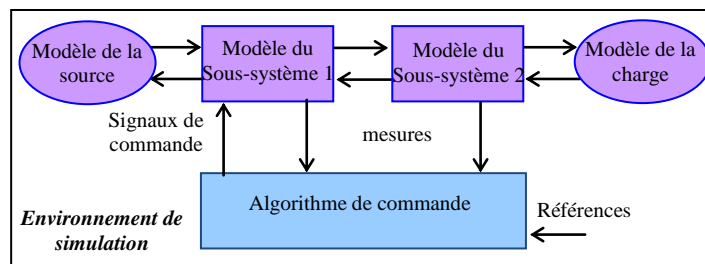


Figure 73 Illustration d'un environnement de simulation

Dans une «simulation HIL» [Maclay 1997] [Isermann 1999], une partie du système est remplacée par une partie réelle (d'où le terme « Hardware » en Anglais) et est incorporée dans la boucle de simulation. Cette partie correspond au sous-système testé en vue de son implantation dans le système complet. Cependant, pour tester ce sous-système, il doit communiquer avec l'environnement de simulation. C'est pourquoi une interface se doit d'exister entre la partie physique (réelle) et la partie simulée.

III.1.b. Différents types de «simulation HIL»

«Simulation HIL» type signal – Une «simulation HIL» de type signal permet de tester l'ECU (Electronic Control Unit) avant son implantation dans le véhicule. Le terme ECU correspond non seulement au microcontrôleur permettant d'effectuer les calculs de la commande en temps réel en fonction des mesures et des références, mais aussi à la commande implantée dans ce dernier. Dans cette simulation toute la partie puissance est remplacée par des modèles dans un environnement de simulation temps réel (Figure 74). Un autre

calculateur temps réel doit donc être utilisé. Le système d'interface ne gère que des signaux, d'où le nom de ce type de «simulation HIL». Lors d'une «simulation HIL» de type signal, les différents modèles du système étudié se doivent d'être d'une grande précision. Plus les modèles seront fins plus les temps de calcul nécessaires seront grands. Aujourd'hui, avec l'augmentation de la rapidité de calcul des calculateurs, il est possible de faire tourner en temps réel des modèles très fins. Cependant, avec un calculateur moins puissant, il est impossible de simuler en temps réel un modèle fin. C'est pourquoi il semble intéressant, pour tester un algorithme de commande ainsi que son calculateur, d'utiliser le système réel au lieu des modèles. Ce type de «simulation HIL» se nomme HIL de type puissance.

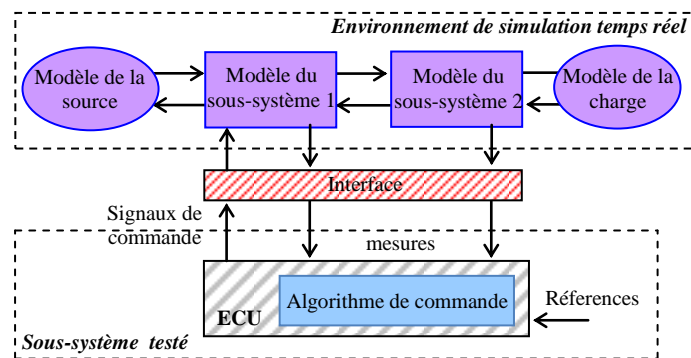


Figure 74 Illustration d'une «simulation HIL» type signal

«Simulation HIL» type puissance – Une «simulation HIL» de type puissance permet de tester l'ECU mais aussi un ou plusieurs sous-systèmes de puissance avant leur implantation dans le système réel complet. Dans une «simulation HIL» de type puissance, le système de puissance est séparé en deux : le sous-système réel testé et le sous-système émulé (Figure 75). L'interface (I sur la Figure 75) échangera donc des variables de puissance avec le sous-système testé et des signaux avec le sous-système émulé. L'objectif de cette simulation est de tester le sous-système dans différents cas de figure avant son implantation dans un système global. Par rapport à un test sur prototype, où les tests sont effectués par un conducteur, dans une «simulation HIL» la répétabilité des essais permet de mieux tester les performances et les modes dégradés des sous-systèmes.

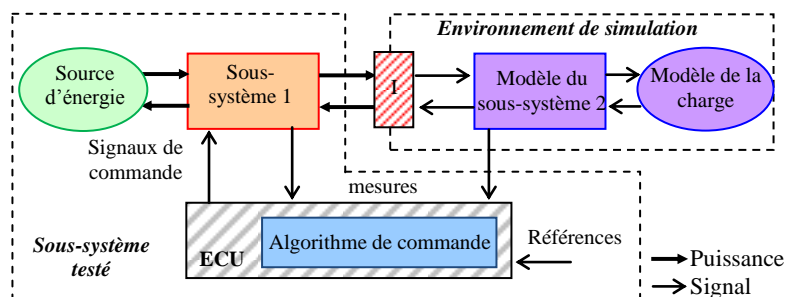


Figure 75 Illustration d'une «simulation HIL» type puissance

Exemple de la «simulation HIL» de type puissance d'un entraînement électrique- Dans cet exemple, l'objectif d'une «simulation HIL» de type puissance est de tester le dimensionnement et le comportement en cyclage de la batterie, la machine électrique, et la commande développée en temps réel [Bouscayrol 2006]. Il est à noter que la commande développée peut ne pas être implantée dans le même ordinateur que celui utilisé sur le vrai système étudié. Dans ce cas, l'ECU ne sera pas validée mais la commande élaborée pourra l'être.

La machine électrique 1 représente la machine électrique utilisée dans notre application (ex : machine de traction dans un véhicule, Figure 76). La source d'énergie représentera la batterie haute tension du véhicule électrique testé (ovale vert, Figure 76). Ne disposant pas de la chaîne de traction du véhicule et n'en ayant pas l'utilité par rapport à l'objectif de cette simulation, cette partie sera émulée (pictogramme violet, Figure 76). Une interface d'adaptation devra donc être définie pour faire le lien entre les signaux provenant de l'émulation de la transmission et l'arbre de la machine électrique représentant la machine de traction. Un élément de puissance, pouvant émuler le comportement de la transmission en effectuant un suivi de vitesse, sera utilisé comme système d'interface (éléments rouges, Figure 76). Dans cet exemple, une machine électrique sera utilisée pour reproduire le comportement de la chaîne de traction émulée. Cette machine électrique sera alimentée en utilisant une source d'énergie extérieure. La validité des modèles utilisés en simulation pourra également être réalisée [Munteanu 2007].

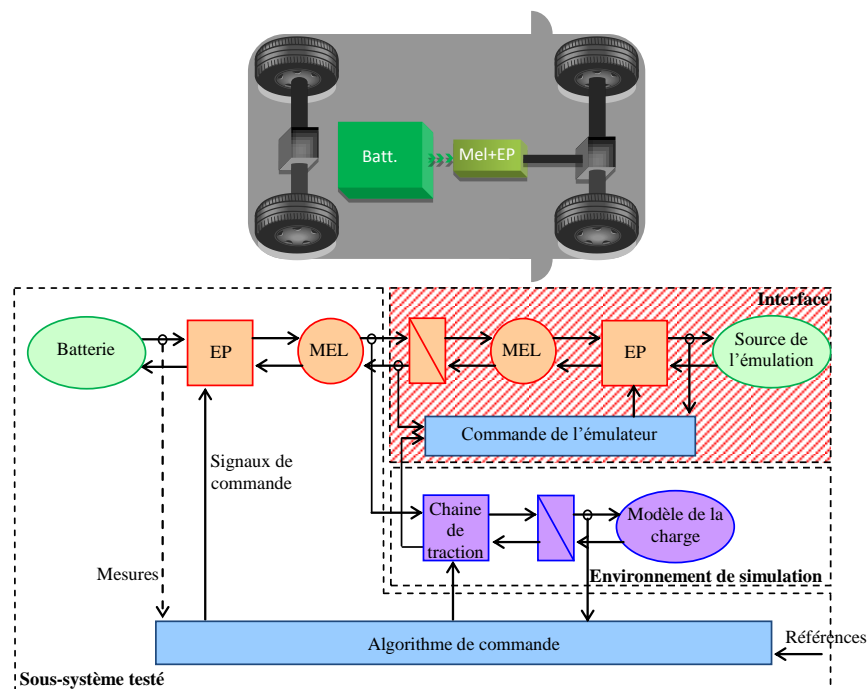


Figure 76 Illustration d'une «simulation HIL» type puissance d'un entraînement électrique

Avantages de l'approche HIL - La «simulation HIL» est considérée comme un outil très puissant car elle permet de tester une partie physique du système (exemple : ordinateur,

machine électrique [Bouscayrol 2009] [Choi 2012], électronique de puissance [Lu 2007]) dans un environnement virtuel complètement contrôlé. La «simulation HIL» permet aussi de tester des éléments en simulation dont les modèles ne paraissent pas assez précis pour subvenir au besoin de la simulation [Burbank 2011]. Enfin, selon la complexité des cas et du matériel disponible, réaliser plusieurs émulations peut faciliter différentes validations partielles permettant une validation finale plus rapide.

Dans le domaine des transports les « simulations HIL » sont de plus en plus développées. En effet, au vu de la complexification de la multiplication des sources d'énergie embarquées dans les véhicules hybrides, la validation partielle d'une partie du véhicule devient une étape incontournable. Concernant les véhicules hybrides, les « simulations HIL » permettent de :

- tester différentes sources d'énergie dans un environnement proche de celui du véhicule [Trigui 2009],
- tester les organes de traction et les organes de la chaîne de traction (exemple : l'embrayage [Lhomme 2007a]) ainsi que leurs dimensionnements avant leurs implantations dans le véhicule,
- tester la portabilité de la commande en temps réel [Letrouvé 2012] [Letrouvé 2013],
- tester les stratégies de gestion de l'énergie sur ces cycles répétables facilement [Kermani 2011] [Grondin 2011].

Identiquement aux véhicules hybrides, les véhicules électriques peuvent avoir un intérêt à utiliser les « simulations HIL » dans différentes étapes de validation [Cheng 2009].

III.1.b. Différentes échelles d'émulation

Echelle d'émulation - Selon certains cas, plusieurs échelles d'émulation peuvent être réalisées lors d'une «simulation HIL» de type puissance. Deux échelles d'émulation seront ici testées : l'émulation à échelle réduite et l'émulation pleine échelle. L'utilisation de ces différentes émulations n'est pas à effectuer systématiquement. Selon la difficulté du système étudié, une seule émulation peut être suffisante. L'incorporation de ces échelles dans le cycle en V (Figure 77) montre l'intérêt des deux échelles : le test des composants à échelle réduite permet, à faible coût de temps et de moyen financier, de valider rapidement les spécifications techniques du cahier des charges. Si cette échelle n'était pas effectuée, le test des composants serait effectué après leurs conceptions. Si un problème de dimensionnement intervenait, le composant devrait être redéfini. Ce qui aurait un impact non négligeable sur le temps de développement et sur le coût financier. Ce test de composant à échelle réduite peut aller jusqu'à l'élaboration d'un prototype à échelle réduite (exemple : Système de stockage du NéoVal [Bouscayrol 2010 a]).

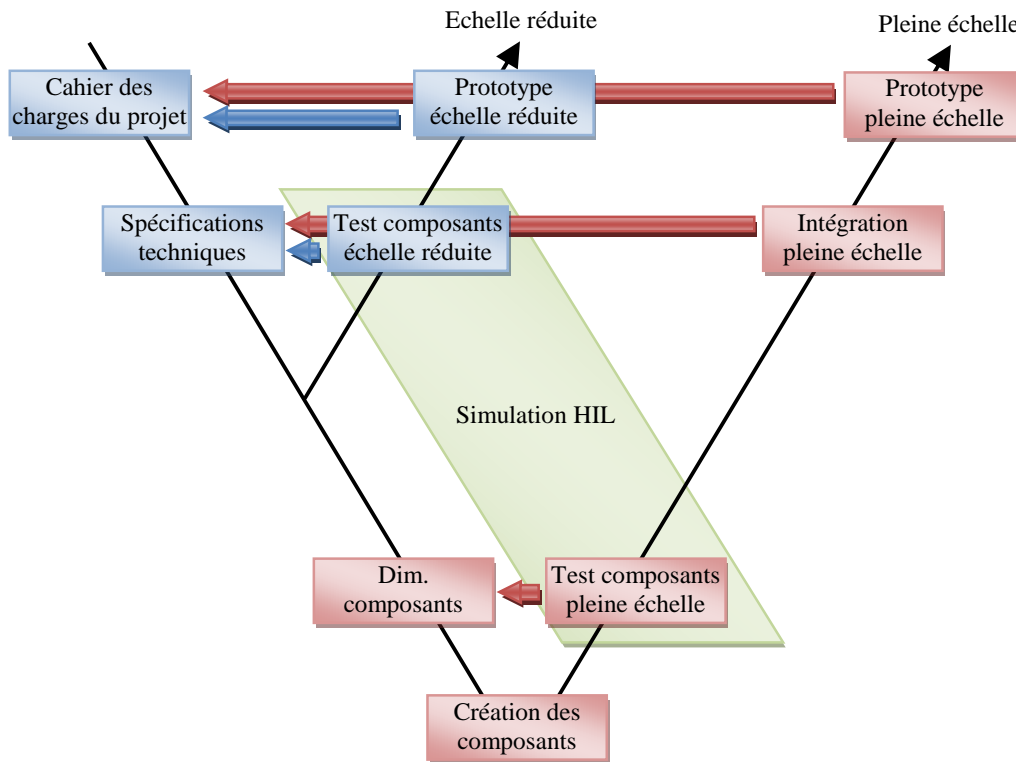


Figure 77 Cycle en V illustrant l'imbrication des échelles d'émulation

Echelle réduite – Lors d'une première validation de la commande, une première émulation à échelle réduite est possible [Bouscayrol 2006] [Allègre 2010 a]. En effet, l'intérêt d'un tel concept est qu'il n'utilise pas des éléments strictement dédiés à l'application étudiée. Une plateforme complètement connue par les différentes « simulations HIL » qui ont été réalisées précédemment est alors disponible. Elle offre donc une grande flexibilité dans le test de différentes topologies. Les objectifs d'une émulation à échelle réduite sont :

- de valider la portabilité de la commande en temps réel,
- d'affiner le cahier des charges.
- de tester des modes dégradés,
- de préparer des éléments pour l'étape suivante («simulation HIL» de type puissance pleine échelle) sans surcoût financier ni de temps de développement,

Pleine échelle – Une émulation pleine échelle, permet de fournir des indications plus précises sur le comportement des différents organes testés dans la «simulation HIL» et de tester les organes finaux en situation réelle. Cette échelle provient de la volonté de tester les organes plus proches de ceux présents dans le prototype. En effet, lors d'une émulation pleine échelle les organes utilisés sont, en général, ceux présents sur le système final. Par rapport à l'incorporation sur un prototype, cette étape ne permettra pas de valider le calculateur, si ce dernier n'est pas le même que celui présent dans le système étudié et ne disposera pas du même environnement que celui du système étudié (CEM, etc.). Les objectifs de cette étape sont de :

- vérifier le fonctionnement des sous-systèmes réels,
- valider les modèles utilisés dans la simulation,
- définir les limitations et contraintes composantes,
- tester les modes dégradés des organes dans un environnement sécuritaire.

III.1.c. Démarche proposée

Il a été mis en évidence précédemment qu'en fonction de la complexité du système étudié, plusieurs étapes de la simulation au prototype sont possibles :

- 1. de la simulation au prototype pleine échelle en ajoutant une étape intermédiaire : «simulation HIL» à échelle réduite,
- 2. de la simulation au prototype pleine échelle en ajoutant une étape intermédiaire : «simulation HIL» pleine échelle,
- 3. de la simulation au prototype pleine échelle en combinant les deux étapes précédentes : «Simulation HIL» à échelle réduite puis «simulation HIL» pleine échelle.

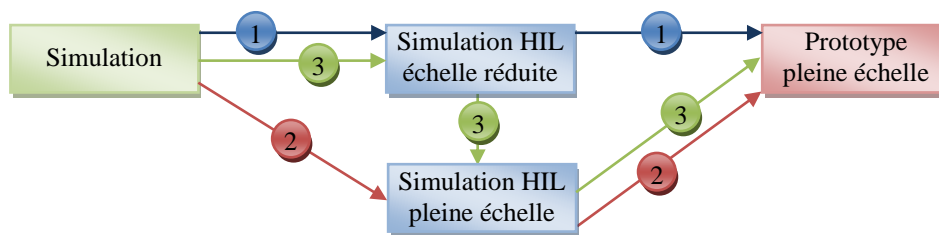


Figure 78 Possibilité d'utilisation des différentes échelles de «simulation HIL»

Dans cette thèse, les différentes possibilités citées précédemment ont été effectuées. Pour cela, deux « simulations HIL » ont été réalisées dans cette thèse :

- Le L2EP dispose d'une plateforme d'émulation composée de 2 bancs chacun composés 3 machines électriques de faible puissance (synchrone, asynchrone et courant continu) (Annexe E). Ces bancs ont été utilisés pour émuler un la traction d'un métro [Verhille 2007b], un système éolien [Bouscayrol 2009] et un véhicule hybride série [Chen 2009]. Ce banc est donc complément connu et les commandes des machines sont déjà effectuées. Une première «simulation HIL» à échelle réduite sera donc effectuée sur ce banc.
- Une plateforme de plus forte puissance sera ensuite mise en place pour effectuer des tests pleine échelle.

La pertinence des différentes échelles d'émulation sera ensuite discutée. Ces résultats seront comparés avec les résultats de simulations effectuées dans le Chapitre II et les résultats d'expérimentation sur prototype dans le Chapitre IV. Cela permettra de déterminer la pertinence de chaque étape dans l'élaboration de la commande d'un véhicule.

III.2. *Emulation à échelle réduite*

III.2.a. Réalisation de la « simulation HIL »

Définition de l'objectif

L'objectif de cette première émulation est de s'assurer de la portabilité en temps réel de la commande systématique développée dans la chapitre II. Pour cela, une émulation de type signal aurait pu être effectuée. L'ECU utilisé lors des « simulations HIL » est une carte microcontrôleur dSPACE 1005. Cet ECU étant différent de celui implanté dans le véhicule, le test de cette commande n'est pas totalement représentatif. Une « simulation HIL » de type puissance a été choisie pour tester à la fois la commande en temps réel et les réels échanges de puissance.

Définition des parties incluses dans l'émulation

Comme énoncé dans le chapitre I, différentes étapes seront ajoutées dans la chaîne de l'élaboration de la commande actuellement utilisée chez PSA Peugeot Citroën. Lors de l'étape d'émulation, une question importante reste la question du découpage : la limite entre « hardware » et « software » (émulation). Dans cette sous-section, plusieurs découpages de la chaîne de traction arrière (Tableau 5) et de la chaîne de traction avant (Tableau 6) seront comparés.

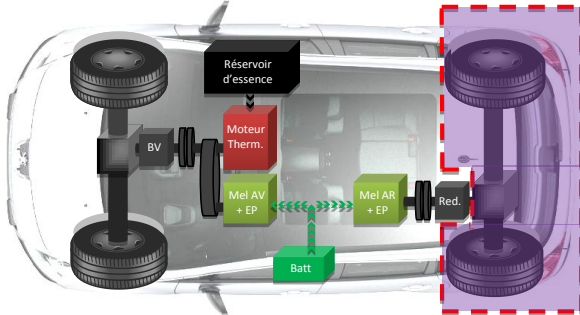
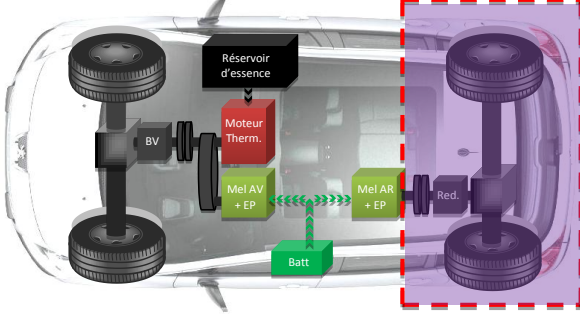
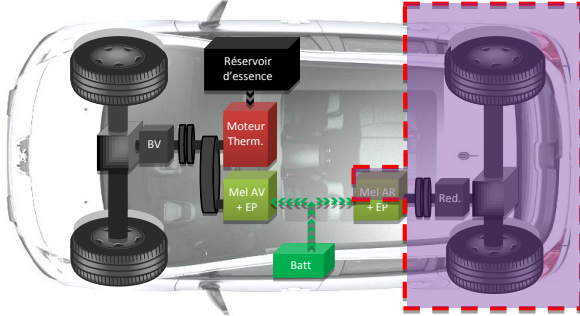
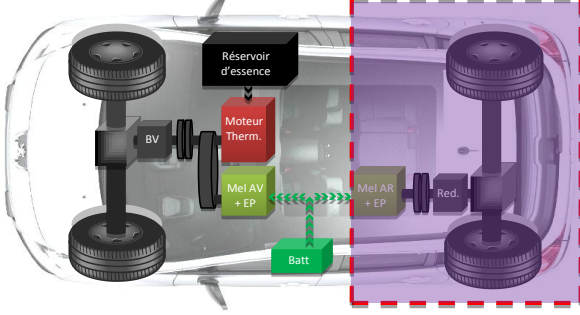
Découpage de la chaîne de traction arrière – Dans cette première chaîne de traction, 4 découpages sont possibles :

- Le premier n'émulerait que la partie mécanique du véhicule (roue, châssis et environnement).
- Le deuxième découpage émulerait toute la chaîne de traction arrière jusqu'à la machine électrique.
- Le troisième découpage émulerait toute la partie mécanique, machine électrique incluse.
- Le dernier découpage possible émulerait tout le véhicule sauf la batterie.

L'objectif des « simulations HIL » de type puissance réalisées dans le cadre de cette thèse est de tester la commande effectuée en simulation ainsi que le comportement des machines représentant les machines de traction. Le deuxième découpage a été choisi pour des raisons de liberté dans le dimensionnement des parties émulées et pour des raisons pratiques dans la mise en place d'un banc disposant d'organes mécaniques complexes. De plus, ce découpage a aussi été choisi car cette « simulation HIL » à échelle réduite étant une étape intermédiaire avec la « simulation HIL » pleine échelle réalisée dans la suite de ce chapitre où

l'objectif est de tester le comportement des machines électriques dans un environnement proche de celui du véhicule.

Tableau 5 Différents découpages de la chaîne de traction arrière et objectifs associés

Découpage de la chaîne de traction arrière	Objectifs
	<p>Dans cette partie, selon les cycles suivis, le test des organes composants la chaîne de traction arrière serait possible : le crabot et le réducteur. L'inconvénient ici est que ces éléments physiques ne pourraient pas être modifiés et différents tests sur le dimensionnement ne pourraient être envisagés.</p>
	<p>Dans ce cas, la puissance du système d'émulation nécessaire dépendra du cycle suivi. L'avantage ici est qu'il est possible de modifier les différentes valeurs des organes émulés pour tester si le dimensionnement est optimal.</p>
	<p>Ce découpage permettrait de tester la batterie ainsi que l'électronique de puissance lié à la machine électrique arrière. La machine électrique arrière étant émulée, il serait possible de jouer sur son dimensionnement.</p>
	<p>Ce découpage a pour objectif de tester le dimensionnement et la technologie de la batterie haute tension utilisée.</p>

Découpage de la chaîne de traction avant – La chaîne de traction avant peut être découpée de 5 façon différentes :

- Le premier découpage, analogue au premier de la chaîne de traction avant, consisterait à n'émuler que la partie mécanique du véhicule (du différentiel au châssis)

- Le deuxième découpage consisterait à ne garder que le GMP avant (moteur thermique et machine électrique avant) ainsi que l'organe de couplage, le système poulie courroie.
- Le troisième découpage émulerait toute la chaîne de traction, moteur thermique inclus, sauf la machine électrique avant.
- Les deux derniers découpages sont analogues aux deux derniers découpages de la chaîne de traction arrière.

Le découpage choisi dans cette thèse est le troisième découpage. En effet, ce découpage permet, au vu du nombre d'organes émulés, de fournir une plus grande flexibilité dans le choix et le dimensionnement des composants. De plus, pour des raisons pratiques, concernant particulièrement la mise en place d'une plateforme composée d'un moteur thermique et de différents organes mécaniques, le troisième découpage offre une plus grande facilité de mise en œuvre.

Tableau 6 Différents découpages de la chaîne de traction avant et objectifs associés

Découpage de la chaîne de traction avant	Objectifs
	<p>Ce découpage est très proche de l'environnement d'un prototype réel. La machine électrique qui émulerait le comportement du châssis devra permettre d'effectuer plusieurs cycles et donc sa puissance sous-jacente.</p>
	<p>Ce découpage a pour objectif de tester l'organe de découplage (embrayage) entre moteur thermique, la machine électrique et l'arbre de transmission. L'inconvénient ici est la mise en place d'une plateforme sécuritaire disposant d'un moteur thermique.</p>
	<p>Cette configuration est la plus souple en terme de choix des composants et de dimensionnement. Le test de la machine électrique dans un environnement identique à celui du véhicule est l'un des objectifs principaux de ce découpage.</p>

Emulation globale réalisée

Les deux machines électriques seront donc conservées dans ces émulations et seront les éléments centraux de ces « simulations HIL » de type Puissance. En effet, l'objectif de ces simulations est de mettre les machines représentant les machines électriques présentes dans le véhicule dans le même environnement électrique et mécanique que celui du véhicule. La Figure 79 montre les différents éléments ainsi utilisés dans le cadre de cette première « simulation HIL » de type puissance ainsi que la structure de la commande associée.

Dans le but de mettre les machines électriques dans le même environnement électrique et mécanique que celui du véhicule, 3 émulations devront être réalisées :

- La première émulation portera sur la mise en environnement électrique des machines électriques. En effet, au vu des puissances induites par l'utilisation de machines électriques de faible puissance l'utilisation d'un ensemble Supercondensateur / hacheur, permettra de fournir une tension d'alimentation contrôlable. De plus, l'utilisation de supercondensateur permettra une plus grande flexibilité lors des essais en pouvant émuler divers types de batteries.
- La deuxième émulation portera sur la mise en environnement mécanique de la machine électrique arrière. Pour effectuer cette émulation, une machine électrique, alimentée par le réseau et contrôlée en vitesse, permettra de placer la machine électrique représentant la machine électrique arrière dans un environnement proche de celui du véhicule.
- La troisième émulation portera sur la mise en environnement mécanique de la machine électrique avant. Cette émulation, basée sur le même principe que l'émulation précédente, prend en compte le comportement du moteur thermique.

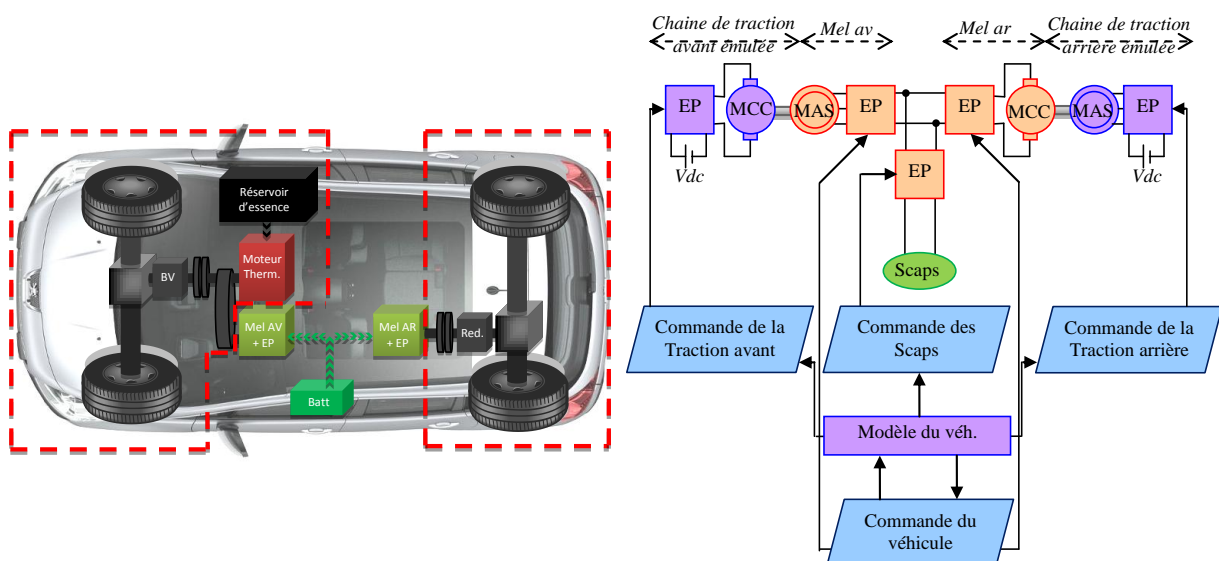


Figure 79 Différentes émulations effectuées dans cette «simulation HIL» à échelle réduite

Pour réaliser les émulations précédemment citées, plusieurs étapes seront nécessaires. La première étape a pour but la définition des parties à émuler. Les systèmes d'interface seront ensuite représentés et commandés en utilisant la REM et ses règles d'inversion. Une simulation de l'émulation sera effectuée sous MATLAB-Simulink. Enfin, la plateforme HIL sera mise en place pour effectuer la simulation étudiée.

Emulation de la batterie

Définition des parties à émuler - Dans cette première émulation, le convertisseur DC/DC utilisé pour connecter le réseau électrique haute tension au réseau électrique basse tension, ainsi que le réseau de bord seront remplacés par une charge résistive de 2,2 kW. La batterie sera aussi émulée. Un système d'interface doit être mis en place pour faire le lien entre la partie électrique (alimentation des onduleurs) et la partie signal (émulation de la batterie haute tension et du convertisseur DC/DC) (Figure 80 a).

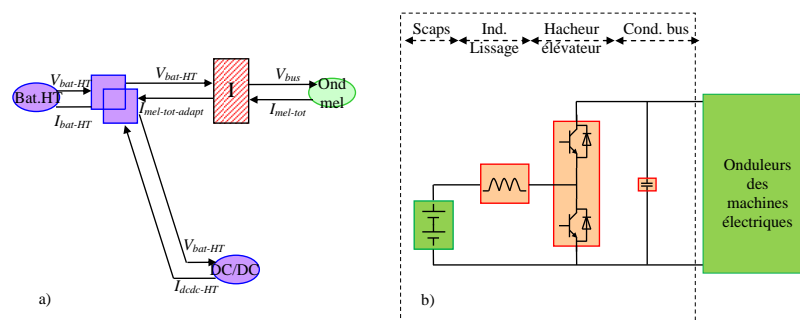


Figure 80 Différentes parties à émuler(a) et mise en évidence du système d'interface (b)

Système d'interface – Le système d'interface doit permettre de fournir une tension de bus contrôlable (Figure 80 b). Un banc de supercondensateurs sera utilisé comme source d'énergie. L'utilisation de supercondensateurs s'explique par leur facilité de mise en œuvre par rapport à une batterie. En effet, au vu de la rapidité lors des charges / décharges des supercondensateurs par rapport à une batterie, il est facile de fixer rapidement un état de charge initial et de le modifier au souhait de la «simulation HIL». La tension du banc de supercondensateurs n'étant pas suffisante pour alimenter les machines électriques dans le même environnement électrique que dans le véhicule un hacheur élévateur est utilisé pour augmenter et contrôler cette tension de bus. La structure du système d'interface est donc composée d'un banc de supercondensateurs, d'une inductance de lissage, d'un hacheur et d'un condensateur de bus.

REM et commande du système d'interface – La REM du système d'interface est réalisée pour pouvoir définir une structure de commande. Le courant de charge ($i_{mel-tot}$) est mesuré pour être implanté dans le modèle de la batterie. Ce modèle, par le principe d'action/réaction, donnera la tension de référence de notre système : la tension qui serait donnée par la batterie aux machines électriques. En utilisant les règles d'inversion de la REM (cf. Chapitre II), nous

obtenons la structure maximale de commande en inversant la chaîne de réglage (Figure 81 b). La «simulation HIL» ainsi effectuée est à échelle réduite. Une adaptation de puissance doit donc être réalisée (cette adaptation est représentée par un élément rectangulaire rouge barré, Figure 81 a). Pour cela, 2 coefficients (26) (27) doivent être calculés en fonction des limitations mises en jeu par la batterie haute tension émulée et le système d'émulation [Allègre 2010 b].

$$\begin{cases} i_{mel-tot-adapt} = k_{adapt-I} i_{mel-tot} & (26) \\ v_{bat-HT-adapt} = k_{adapt-u} v_{bat-HT} & (27) \end{cases}$$

avec $k_{adapt-I}$ et $k_{adapt-u}$, les coefficients d'adaptation entre la partie émulée et la partie émulatrice.

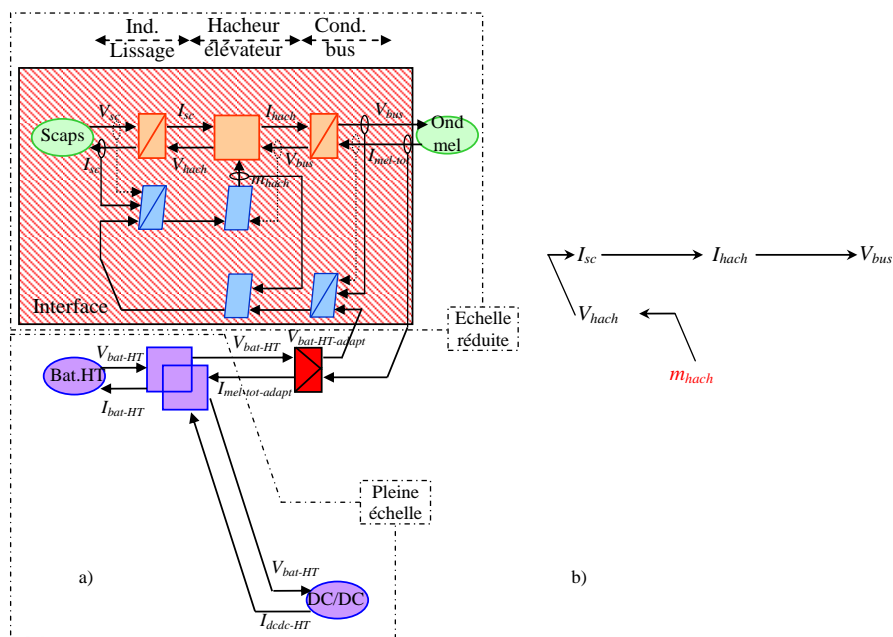


Figure 81 REM, commande (a) et chaîne de réglage (b) de la Structure émulatrice de la batterie

Simulation de la «simulation HIL» – Un environnement de test a été réalisé dans le but de tester le système en simulation avant de l'implanter sur une carte microcontrôleur temps réel. La REM et la commande du système d'émulation effectuée précédemment sont directement implantées en simulation sous le logiciel MATLAB-Simulink (Figure 82).

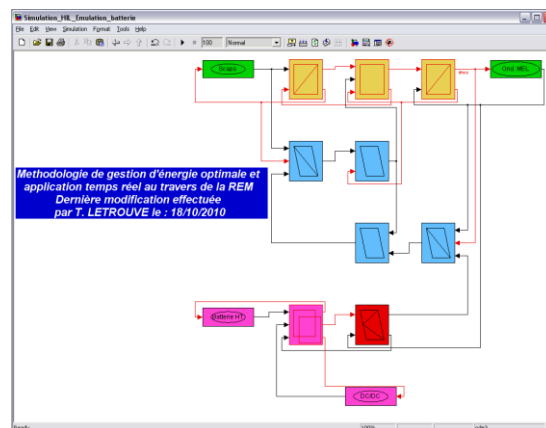


Figure 82 Implantation sous MATLAB-Simulink de la REM et de sa commande

Test de l'émulation de la tension batterie – Cette simulation a pour objectif d'émuler la tension de la batterie haute tension à l'aide des supercondensateurs et du hacheur. Un courant de charge représentatif d'un appel de courant d'une machine électrique lors d'un cycle ECE est utilisé. Le résultat de simulation Figure 83 montre que la tension en sortie du condensateur de bus est bien représentative de la tension de la batterie émulée.

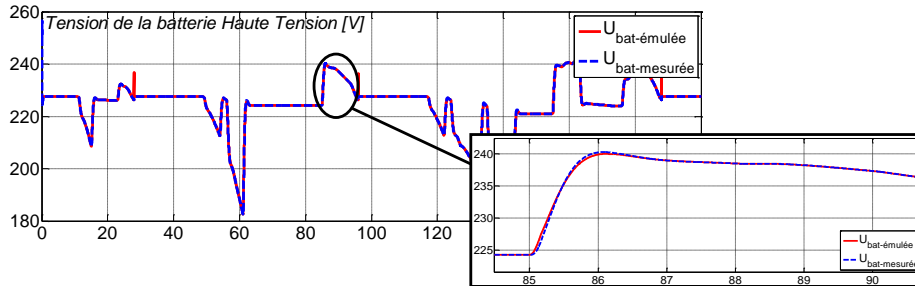


Figure 83 Test de l'émulation de la batterie HT

Emulation de la chaîne de traction arrière

Définition des parties à émuler – A partir de la REM et de la commande définie dans le chapitre II, les différents organes inclus dans l'émulation peuvent facilement être mis en avant (Figure 84). En effet, dans ce système, les parties testées comprennent la machine électrique arrière, et la commande associée. Un système d'interface doit donc être mis en place pour faire le lien entre la partie mécanique (l'arbre de la machine électrique arrière) et la partie signal (l'émulation de la chaîne de traction arrière).

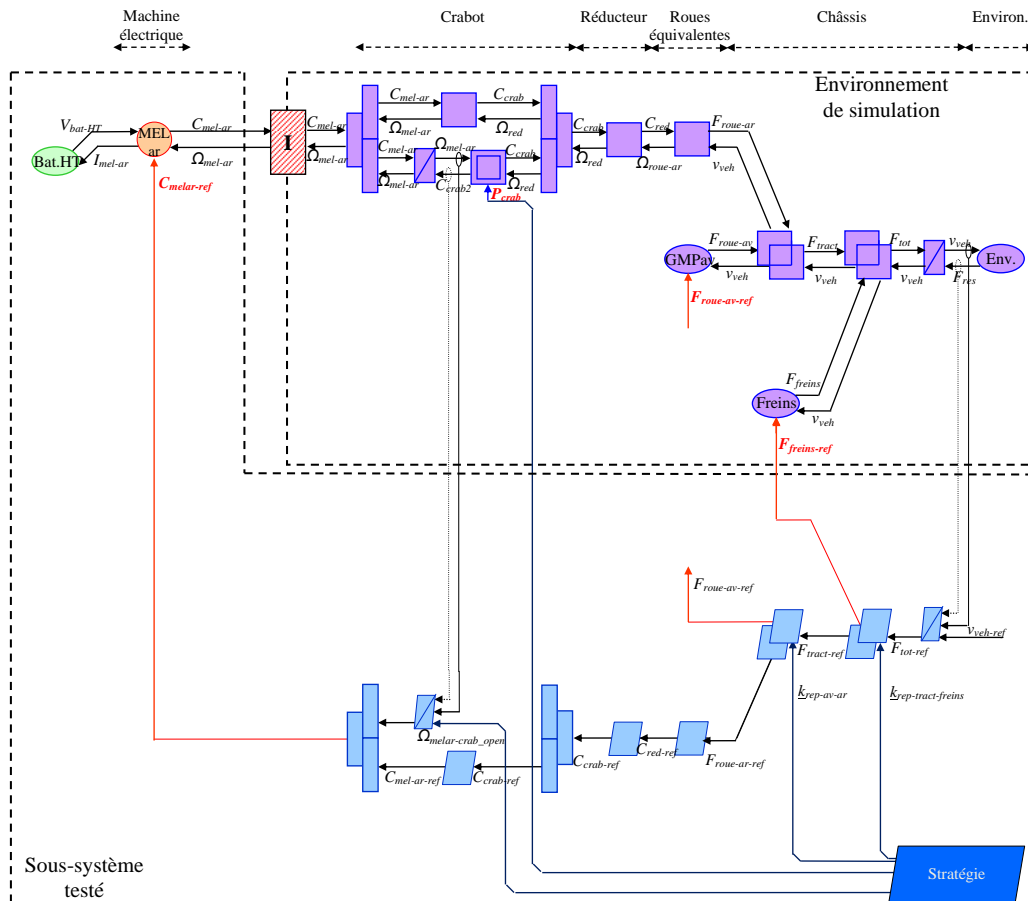


Figure 84 Différentes parties à émulée et mise en évidence du système d'interface : émulation de CdT arrière

Système d'interface – Le système d'interface doit permettre de fournir une vitesse d'arbre contrôlable (Figure 85). La machine synchrone de 20 kW est représentée par une machine à courant continu de 1,5 kW. La chaîne de traction arrière, du crabot jusqu'au châssis, est émulée par une machine asynchrone de 1,5 kW contrôlée en vitesse. L'électronique de puissance de la machine émulative est alimentée par une source d'énergie extérieure, ici le réseau.

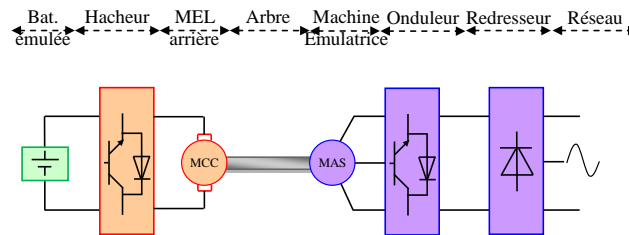


Figure 85 Structure émulative de la chaîne de traction arrière

REM et commande du système d'interface – La REM du système d'interface précédent est réalisée pour pouvoir définir une structure de commande. Le couple fourni par la machine électrique arrière est mesuré ou estimé, puis utilisé dans l'émulation de la chaîne de traction. Par réaction, la chaîne de traction émulée fournira une consigne de vitesse à la machine qui émuler son comportement (Figure 86). En utilisant les règles d'inversion de la REM, nous obtenons la structure maximale de commande. La « simulation HIL » ainsi effectuée est à échelle réduite. Une adaptation en couple et en vitesse est nécessaire sur la partie puissance entre la machine électrique de traction de 20 kW présente dans le véhicule et la machine la représentant de 1,5 kW (28) (29).

$$\begin{cases} C_{melar-adapt} = k_{adapt-Cmelar} C_{mel-ar} & (28) \\ \Omega_{melar-ref-adapt} = k_{adapt-\Omega melar} \cdot \Omega_{mel-ar} & (29) \end{cases}$$

avec, $k_{adapt-Cmelar}$, le coefficient d'adaptation de couple entre la partie émulée et la partie émulative ; $k_{adapt-\Omega melar}$, le coefficient d'adaptation de vitesse entre la partie émulée et la partie émulative.

Ce bloc d'adaptation étant ajouté au niveau de l'émulation du véhicule un bloc doit également inverser ce bloc dans la commande globale du véhicule (30).

$$C_{melar-ref-adapt} = \frac{C_{melar-ref}}{k_{adapt-Cmelar}} \quad (30)$$

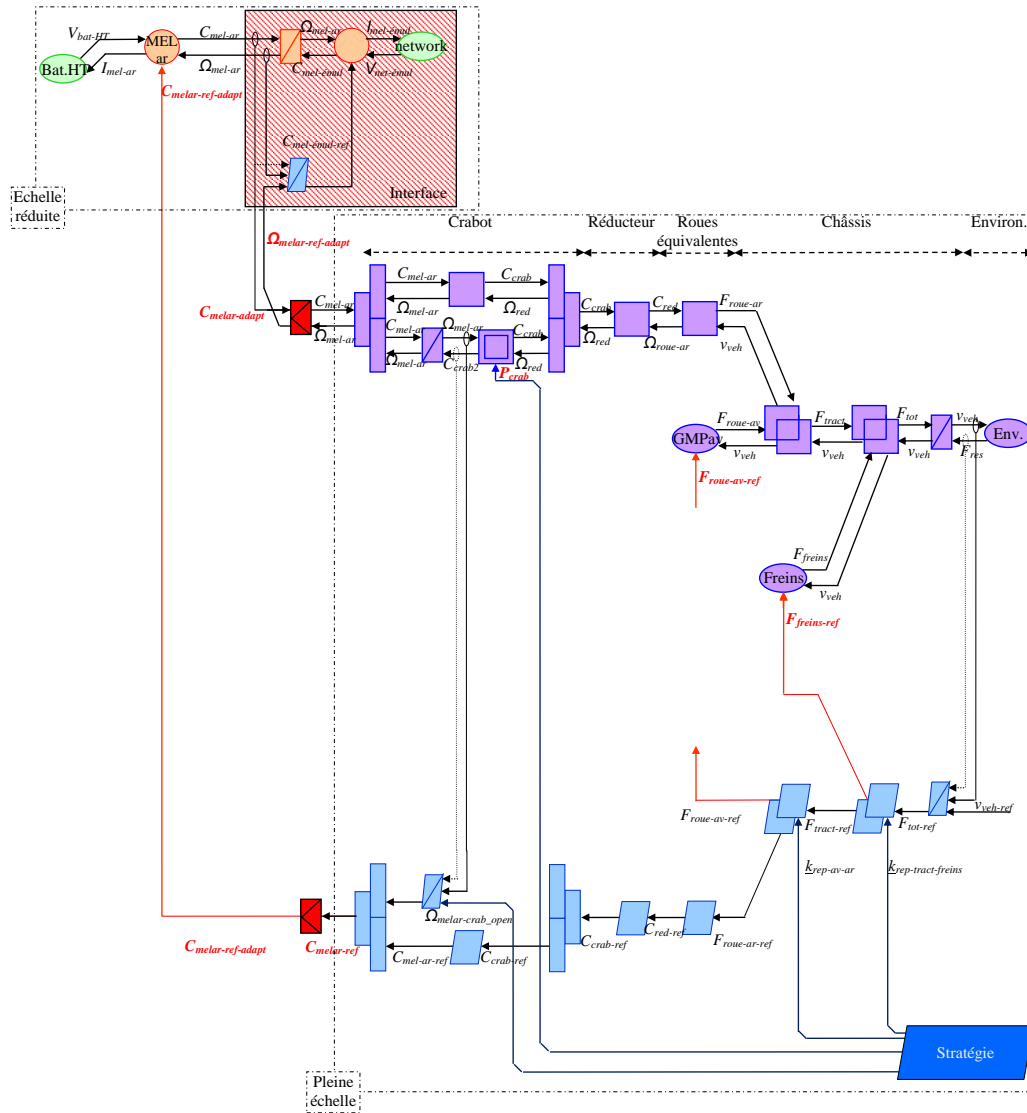


Figure 86 REM et commande par inversion du système d'interface de la chaîne de traction arrière

Emulation de la chaîne de traction avant

Définition des parties à émuler - A partir de la REM et de la commande définies dans le chapitre II, les différents organes inclus dans l'émulation peuvent facilement être mis en avant (Figure 87). En effet, dans ce système les parties testées comprennent la machine électrique avant, la commande associée. Un système d'interface doit donc être mis en place pour faire le lien entre la partie mécanique (l'arbre de la machine électrique avant) et la partie signal (la chaîne de traction avant émulée).

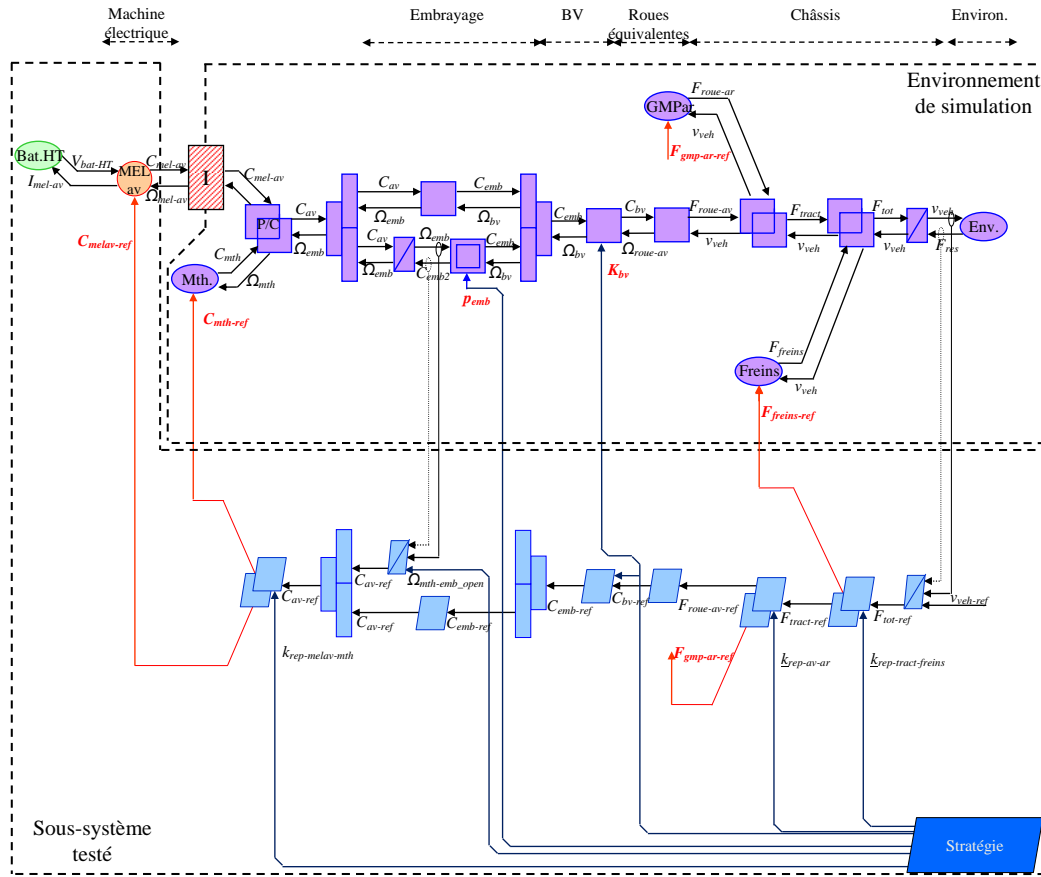


Figure 87 Différentes parties à émulée et mise en évidence du système d'interface : émulation de CdT avant

Système d'interface – Le système d'interface doit permettre de fournir une vitesse d'arbre contrôlable (Figure 88). La machine synchrone de 7 kW est représentée par une machine asynchrone de 1,5 kW. La chaîne de traction avant, de l'embrayage jusqu'au châssis, moteur thermique compris, est émulée par une machine à courant continu de 1,5 kW contrôlée en vitesse. L'électronique de puissance de la machine émulateur est alimentée par une source d'énergie extérieure, ici le réseau.

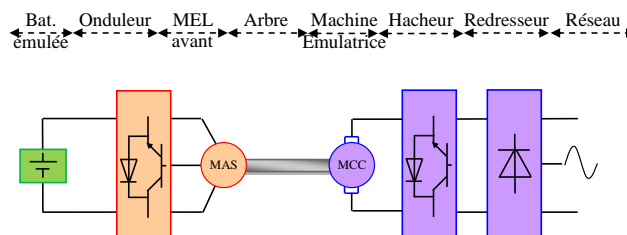


Figure 88 Structure émulateur de la chaîne de traction avant

REM et commande du système d'interface – De la même façon que pour l'émulation de la chaîne de traction arrière : par réaction au couple de la machine représentant la machine électrique avant, la chaîne de traction émulée fournira une consigne de vitesse à la machine qui émuler son comportement (Figure 89). Au vu de l'échelle d'émulation temps réel, une adaptation de puissance est donc à réaliser entre la machine électrique de 7 kW présente dans le véhicule et la machine la représentant de 1,5 kW.

$$\begin{cases} C_{melav-ref-adapt} = k_{adapt-Cmelav} C_{melav-ref} & (31) \\ \Omega_{melav-ref-adapt} = k_{adapt-\Omega melav} \Omega_{mel-av} & (32) \end{cases}$$

avec, $k_{adapt-Cmelav}$, le coefficient d'adaptation de couple entre la partie émulée et la partie émulatrice ; $k_{adapt-\Omega melav}$, le coefficient d'adaptation de vitesse entre la partie émulée et la partie émulatrice.

Le coefficient utilisé entre le couple mesuré de la machine électrique avant et la chaîne de traction émulée sera utilisé pour l'adaptation du couple de référence provenant de la commande globale (33).

$$C_{melav-ref-adapt} = \frac{C_{melav-ref}}{k_{adapt-Cmelav}} \quad (33)$$

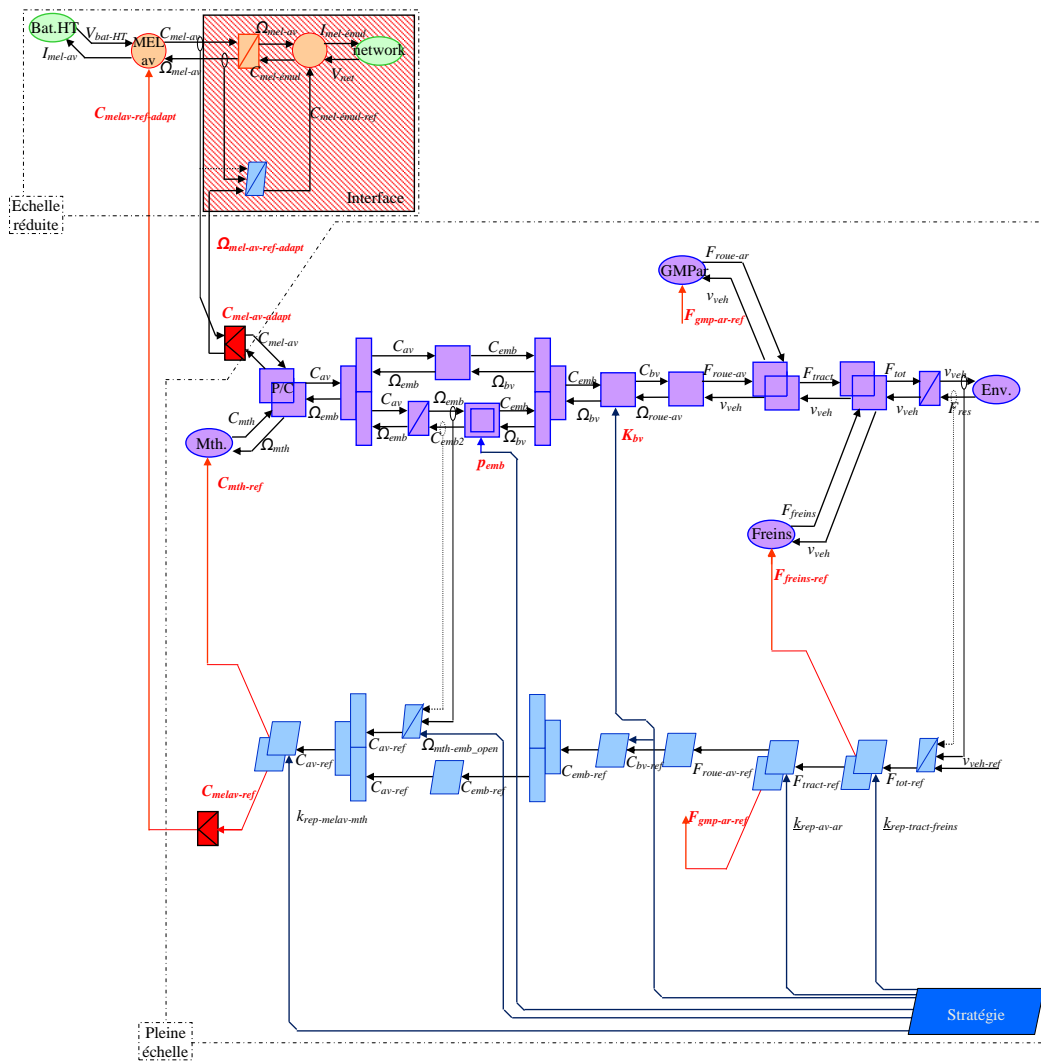


Figure 89 REM et commande par inversion du système d'interface de la chaîne de traction avant

Simulation de la «simulation HIL» – Un environnement de test a été réalisé dans le but de tester le système en simulation avant de l'implanter dans la carte microcontrôleur dSPACE. La REM globale, comprenant les différentes émulations faites précédemment (Figure 90) est directement implantable dans le logiciel MATLAB-Simulink (à droite Figure 91). Seuls les

blocs de commandes (bleu) et les blocs d'émulation (violet) seront repris lors de l'émulation temps réel. Les autres blocs étant la simulation de la plateforme de test.

Remarque : lors des précédentes REM élaborées, les machines électriques étaient représentées en utilisant des modèles quasi-statiques. Dans le cadre d'une «simulation HIL», les modèles quasi-statiques doivent être remplacés par des modèles dynamiques. Leurs commandes sont effectuées en utilisant les règles d'inversion de la REM. Dans le cadre de cette première «simulation HIL» seules 2 machines sont utilisées : MCC de 1,5 kW et MAS de 1,5 kW.

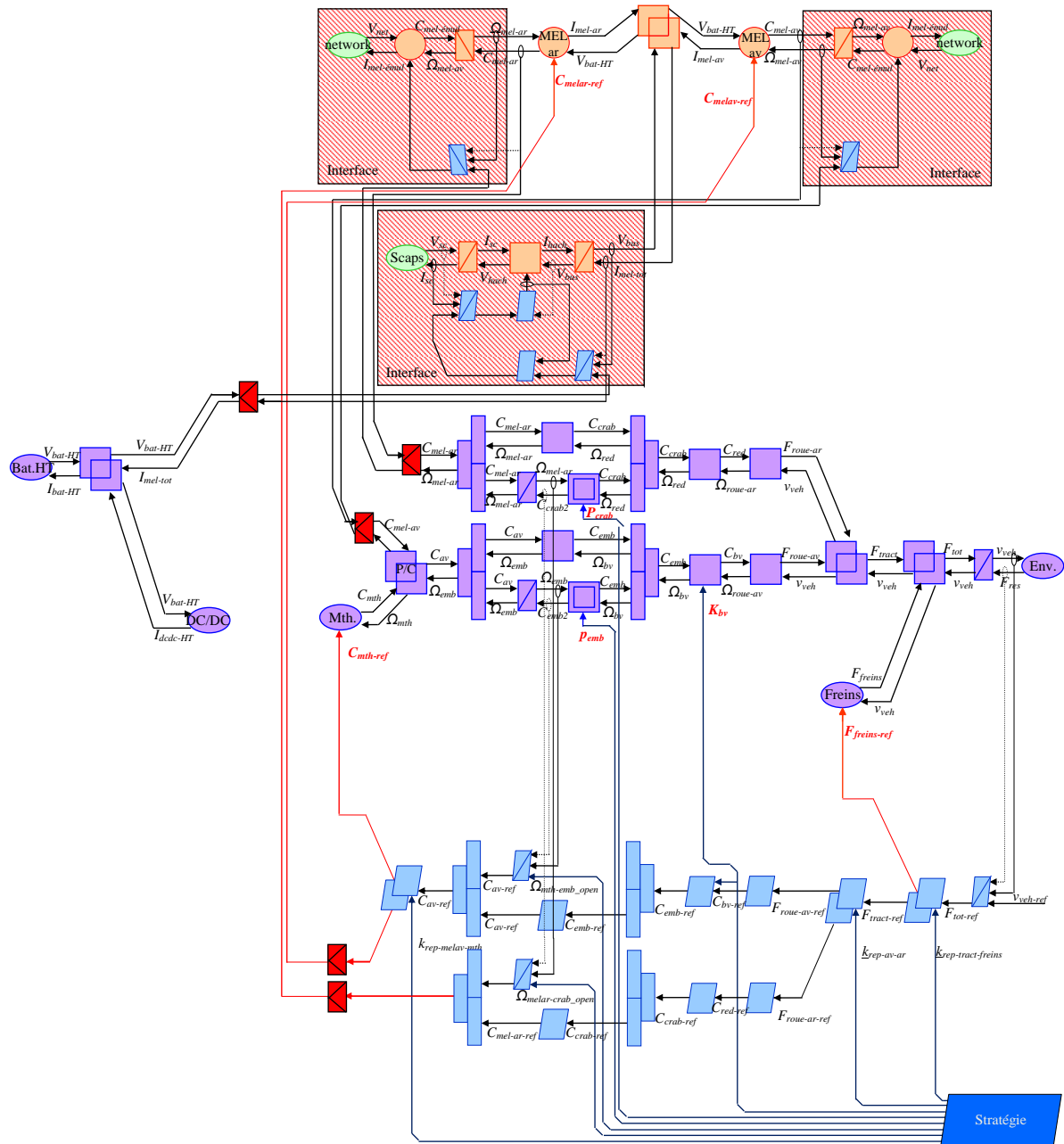


Figure 90 REM et commande par inversion de l'émulation complète

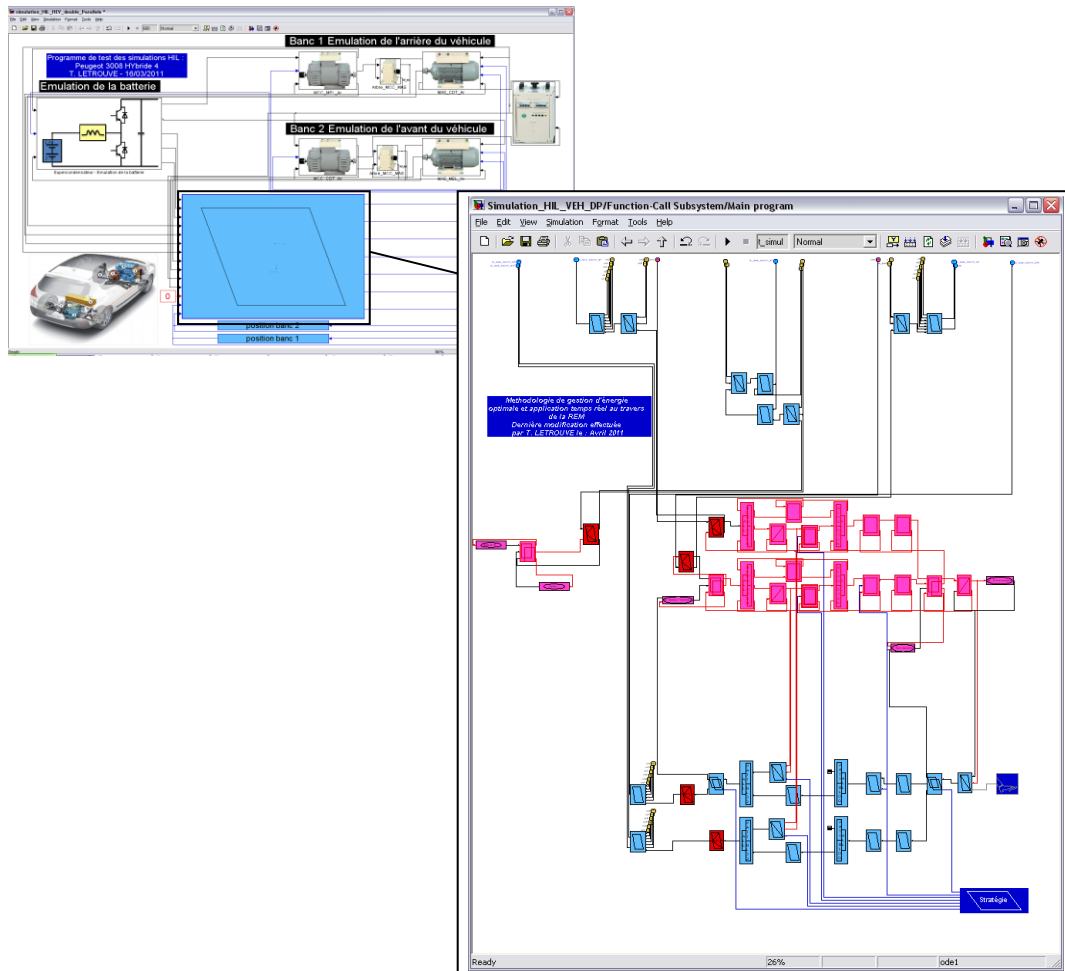


Figure 91 Simulation effectuée sous MATLAB-Simulink

Résultats de simulation – Les résultats de simulation (Figure 92) montrent les huit modes de fonctionnement d'un véhicule hybride qui ont été utilisés (cf. Chapitre II). L'objectif de la stratégie étant de garder l'état de charge de la batterie entre 75% et 90% de son état de charge maximal. Cette émulation est faite sur un cycle NEDC réduit : en effet, ce cycle est composé d'un cycle ECE-15 au lieu de trois.

Lors d'une première phase, le véhicule fonctionne à vitesse faible ($v_{veh} < 50$ km/h), le véhicule fonctionne donc en tout électrique : seule la machine électrique arrière fournit le couple nécessaire à la poursuite de consigne du conducteur. Lorsque l'état de charge est trop bas, le moteur thermique démarre pour ne plus utiliser la batterie haute tension pour la traction. Seul le moteur thermique fournira le couple nécessaire. Lors des phases de décélération, l'embrayage du moteur thermique est ouvert pour permettre la récupération maximale de l'énergie par la machine électrique arrière. Si l'état de charge à l'arrêt le nécessite, la machine électrique avant peut, par l'intermédiaire du moteur thermique, recharger la batterie à l'arrêt.

Cette simulation prépare l'organisation de la commande : commande des machines et vérification des entrées / sorties nécessaires, avant son implantation sur microcontrôleur.

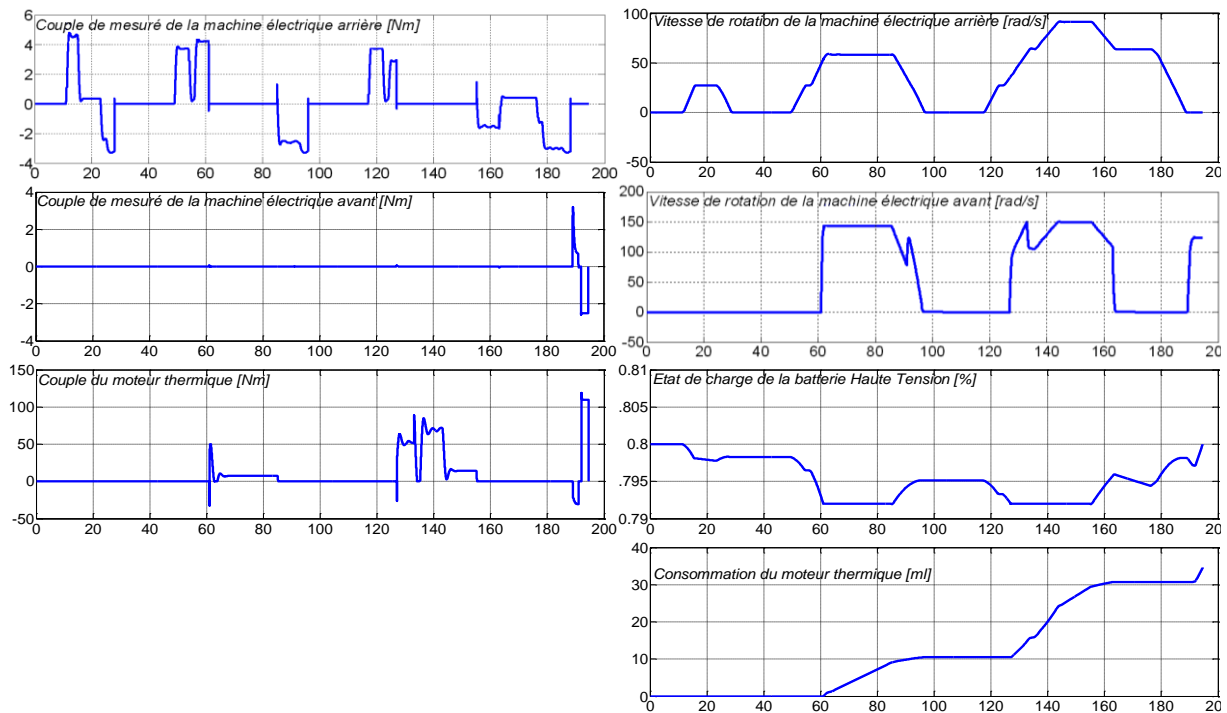


Figure 92 Résultats de simulation de la «simulation HIL» réalisée sous MATLAB-Simulink

III.2.b. Résultats d'expérimentation

«Simulation HIL» de la batterie haute tension – Pour valider en expérimentation l'émulation de la batterie HT, la stratégie forcera le véhicule à n'utiliser que le mode tout électrique. La machine électrique de traction (arrière) suivra donc un cycle de vitesse urbain type ECE. L'expérimentation ainsi réalisée (Figure 93) permet de valider l'émulation de la batterie haute tension en utilisant le système d'émulation précédemment défini.

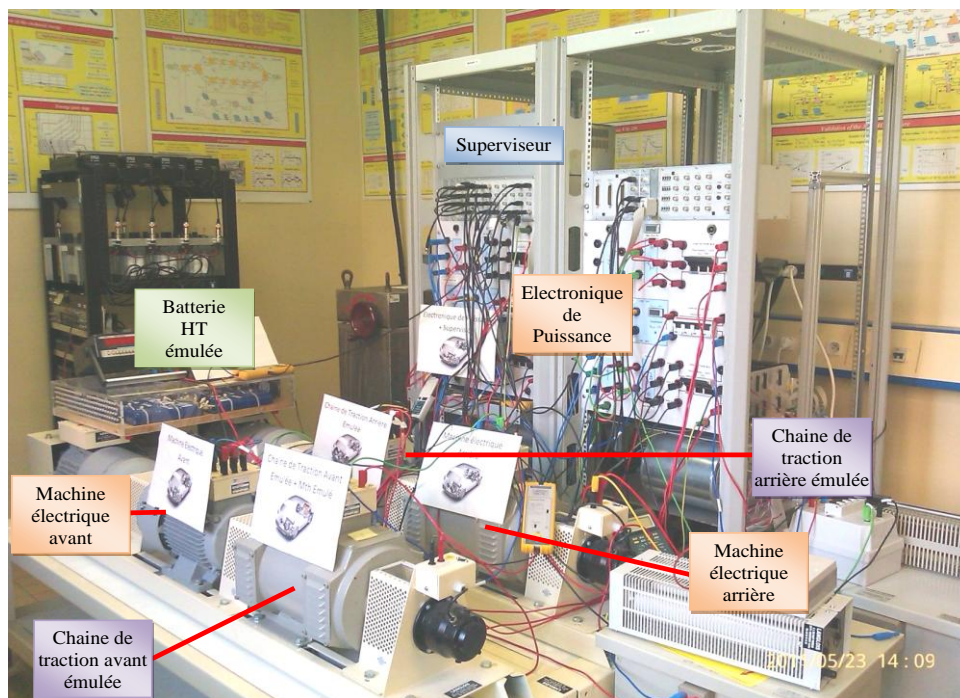


Figure 93 Plateforme utilisée pour effectuer l'émulation à échelle réduite

La Figure 94 montre le résultat de la commande de l'ensemble Supercondensateur/hacheur en tension. Cette tension suit bien la consigne de référence donnée par l'émulation de la batterie haute tension. La différence entre la tension émulée de la Figure 83 provient des hypothèses de modélisation utilisées lors de la simulation (fréquence de découpage).

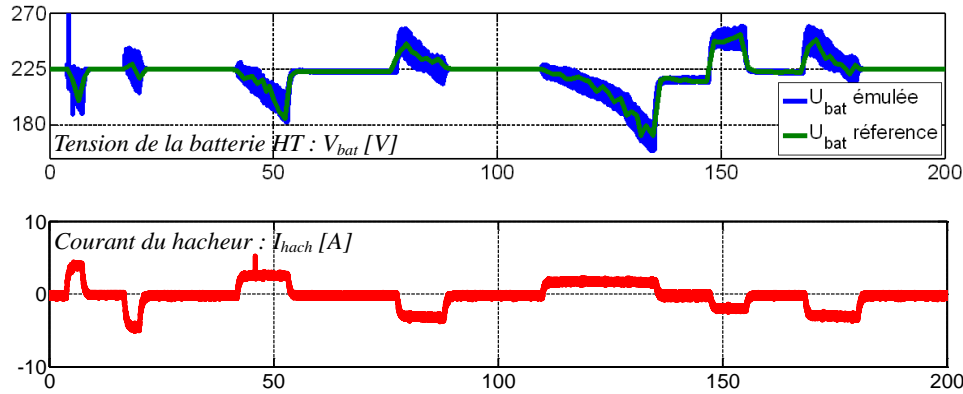


Figure 94 Résultat d'expérience de l'émulation de la tension de batterie

«**Simulation HIL**» du véhicule – Pour réaliser cette expérimentation, le câblage effectué (Figure 93) prend en compte l'émulation des chaînes de traction avant et arrière, mais aussi l'émulation de la batterie par les supercondensateurs.

Interface homme machine élaborée – Une interface Control Desk a été réalisée (Figure 95). Sur cette plateforme on peut identifier :

- les boutons d'activation des contacteurs (carré en haut à gauche) : ces derniers permettant l'activation des ponts de diodes et des onduleurs,
- les boutons de sélection du mode (milieu haut) : l'utilisateur peut choisir entre un cycle urbain (ECE), extra-urbain (EUDC), ou mixte NEDC.
- les jauges de vitesse, de SoC de la batterie et mesures temps réel (centre),
- la visualisation de la consommation et de la pollution du véhicule Hybride 4 ainsi qu'une 3008 conventionnelle (2.0L HDI FAP 110kW) (milieu droite),
- la visualisation de l'état (actif ou non) des machines électriques et du moteur thermique (bas droite).

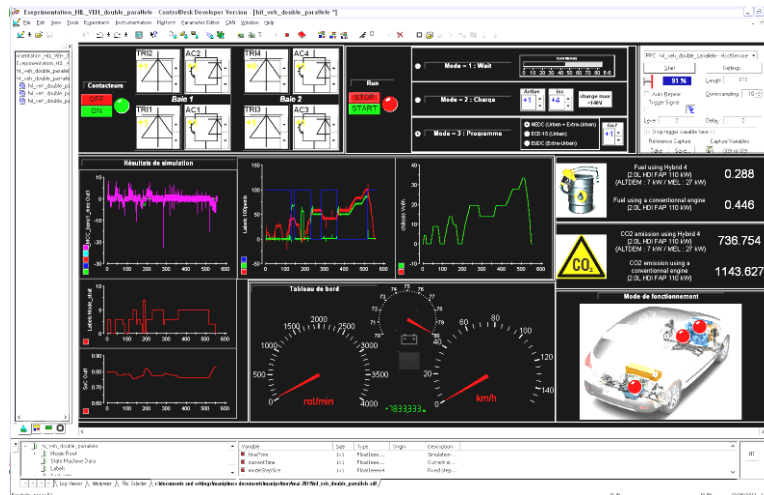


Figure 95 Plateforme Control Desk

Test de l'émulation de la partie mécanique – Dans notre application, deux consignes de vitesse sont données : la vitesse de la chaîne de traction arrière et celle de la chaîne de traction avant. Ces deux vitesses peuvent être découplées des roues et donc avoir des vitesses non proportionnelles à la vitesse du véhicule. Les deux composants permettant cette propriété sont : le crabot et l'embrayage. Le crabot sera toujours fermé lors de ce test. L'embrayage, quant à lui, ne sera fermé que si le moteur thermique est sollicité : demande en couple trop importante est demandée par le conducteur (mode boost), vitesse du véhicule dépasse les 50 km/h ou si l'état de charge de la batterie passe en dessous d'un seuil fixé (75%).

Test du comportement des machines de traction et du moteur thermique émulé – Lors des phases de roulage tout électrique ($0 s < t < 80 s$), seule la machine électrique arrière fournit un couple au véhicule. Lorsque l'état de charge est passé en dessous du seuil minimum ($t=345 s$), le moteur thermique fournit seul le couple nécessaire au véhicule pour suivre la consigne. Le mode boost n'est, ici, pas visible car le cycle NEDC (New European Driving Cycle) est un cycle avec des dynamiques très lentes.

Mode de recharge via le moteur thermique – Dans la stratégie de départ, la possibilité que deux modes soient actifs en même temps n'est pas considérée. De ce fait, une recharge via le moteur thermique et la machine de traction avant et une traction avec la machine électrique arrière a été interdite. Un niveau de seuil d'état de charge lorsque le véhicule est à l'arrêt a été défini. Lorsque cet état de charge est atteint et que le véhicule est à l'arrêt la machine électrique avant va démarrer le moteur thermique qui fournira un couple à la machine électrique avant pour recharger la batterie. Ce mode est visible à $t = 80s$.

Lors de cette «simulation HIL», la portabilité de la commande en temps réel a bien été validée. Il est désormais possible, grâce à cette «simulation HIL», d'analyser les différents échanges d'énergie dans notre système et de tester différentes stratégies de gestion de l'énergie. Malgré la complexité de la commandé développée, en incluant la commande

rapprochée des entrainements, le fonctionnement de cette commande a pu être vérifié en temps réel. Les différents blocs de la REM (commande et modèles émulés) ont été d'une grande aide dans l'organisation générale de cette émulation temps réel. Les divers modes de fonctionnement ainsi que les différentes transitions entre les différents modes ont ainsi prouvés leurs bons fonctionnements.

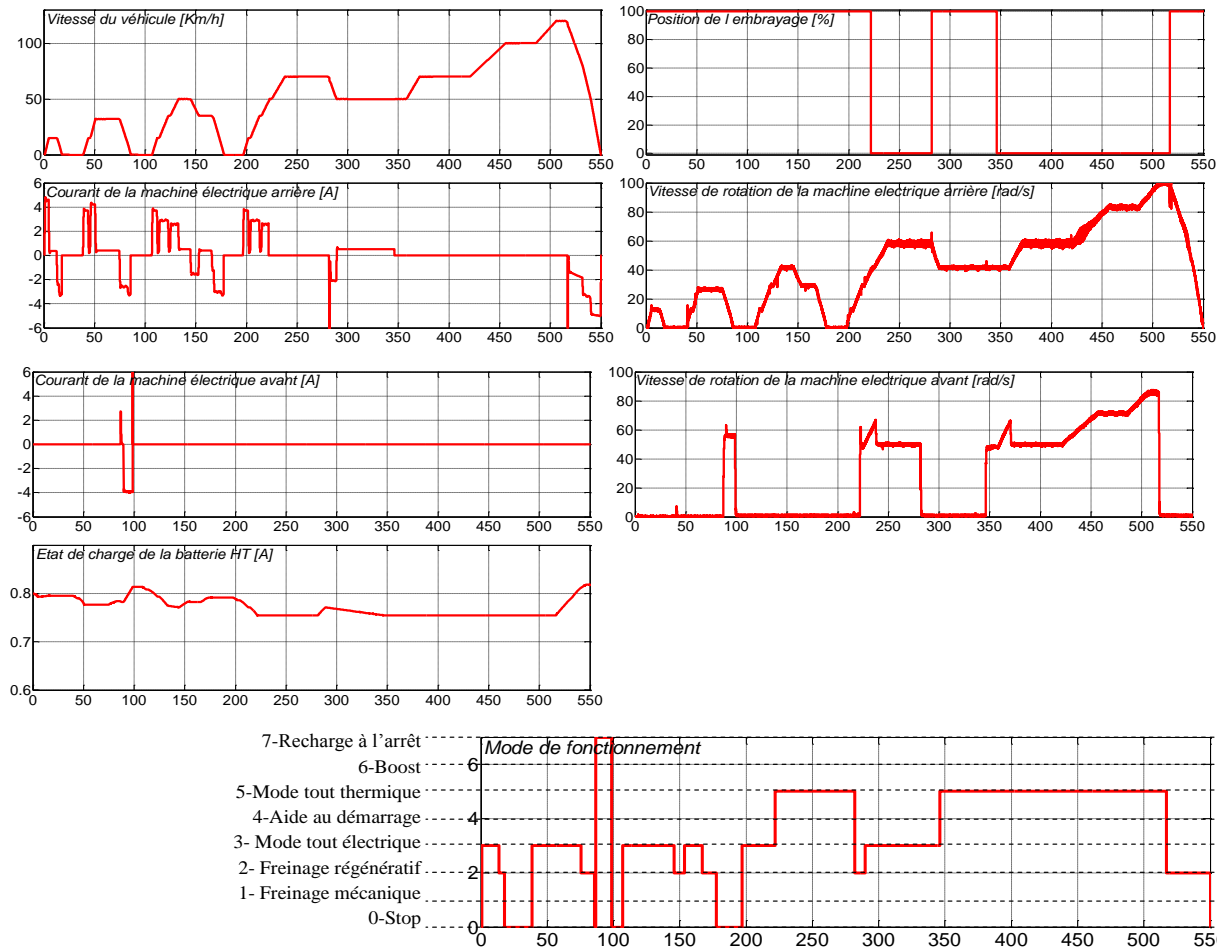


Figure 96 Résultats de la «simulation HIL» du véhicule Hybride 4

III.3. Emulation à pleine échelle

III.3.a. Réalisation de la « simulation HIL »

Par rapport à la «simulation HIL» à échelle réduite réalisée dans la section précédente, cette simulation à pleine échelle remplace les machines électriques représentant les deux machines électriques présentes dans le véhicule par des machines de mêmes technologies : machine synchrone à aimant permanent (Figure 97). De plus, la puissance des machines électriques utilisées permet d'effectuer une émulation pleine échelle sur certains cycles. Les supercondensateurs de type Maxwell utilisés dans la « simulation HIL » à échelle réduite seront remplacés par des supercondensateurs de plus fortes valeurs.

La machine électrique avant de 7 kW sera représentée par une machine synchrone de 10 kW, la machine émulant la chaîne de traction avant, moteur thermique inclus, sera une machine à courant continu de 14 kW. A l'arrière du véhicule la machine électrique de 20 kW sera représentée par une machine de même puissance, la machine émulant la chaîne de traction arrière sera une machine asynchrone de 20 kW. Les machines électriques ne sont, contrairement à la philosophie de la pleine échelle, pas celles implantées dans le véhicule. Ce choix a été effectué par rapport à la problématique du coût de construction d'une machine prototype et par rapport à des contraintes de disponibilités. Cependant, l'utilisation de machines de même puissance permettra de tester les flux électriques.

L'échelle de l'émulation temps réel réalisée n'influera que peu sur la structure de la «simulation HIL». Tous les principes de l'émulation (interface, etc.) ont déjà été présentés dans la section précédente.

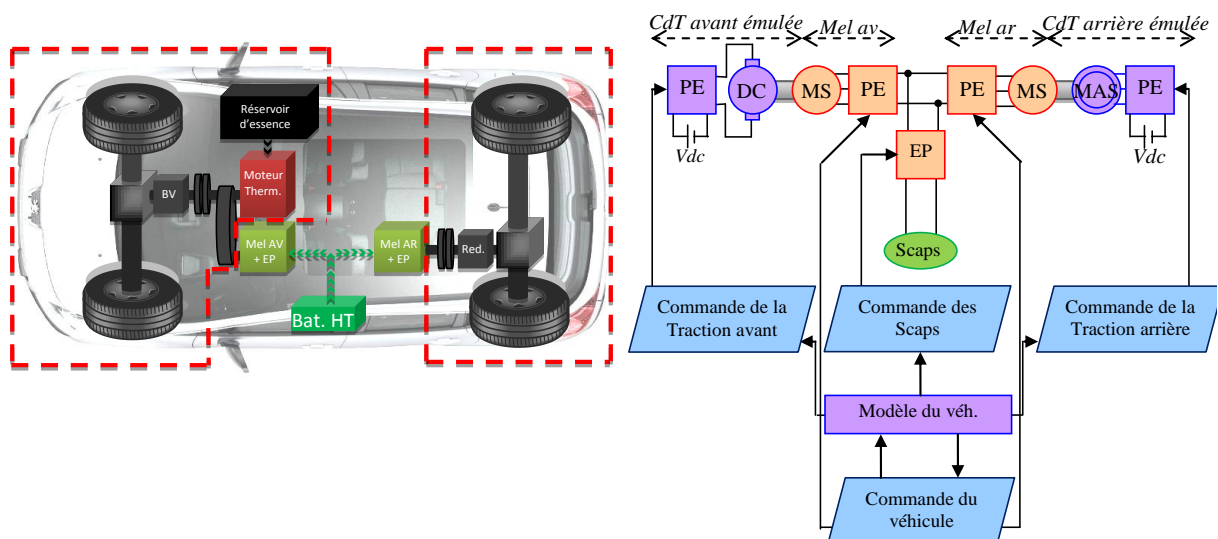


Figure 97 Différentes émulations effectuées dans cette «simulation HIL» à échelle réduite

REM et commande du système d'interface – Les différences présentées précédemment vont naturellement avoir un impact sur la structure du système d'interface et sa commande.

Tout d'abord, la REM ainsi que la commande des machines vont naturellement changer avec la technologie de machine utilisée. La machine électrique qui représentait la machine électrique avant (Machine asynchrone de 1,5 kW) sera remplacée par une machine synchrone à aimant permanent de 10 kW. La machine électrique qui représentait la machine électrique arrière (Machine à courant continu de 1,5 kW) sera remplacée par une machine synchrone à aimant permanent de 20 kW. La première étape a donc été de réaliser les commandes des machines du banc (machine à courant continu, machine synchrone à aimant permanent, machine asynchrone).

Ensuite, l'émulation de la batterie par un système composé de supercondensateurs et d'un hacheur élévateur est effectuée de la même façon que lors de la « simulation HIL » à échelle réduite (Figure 98).

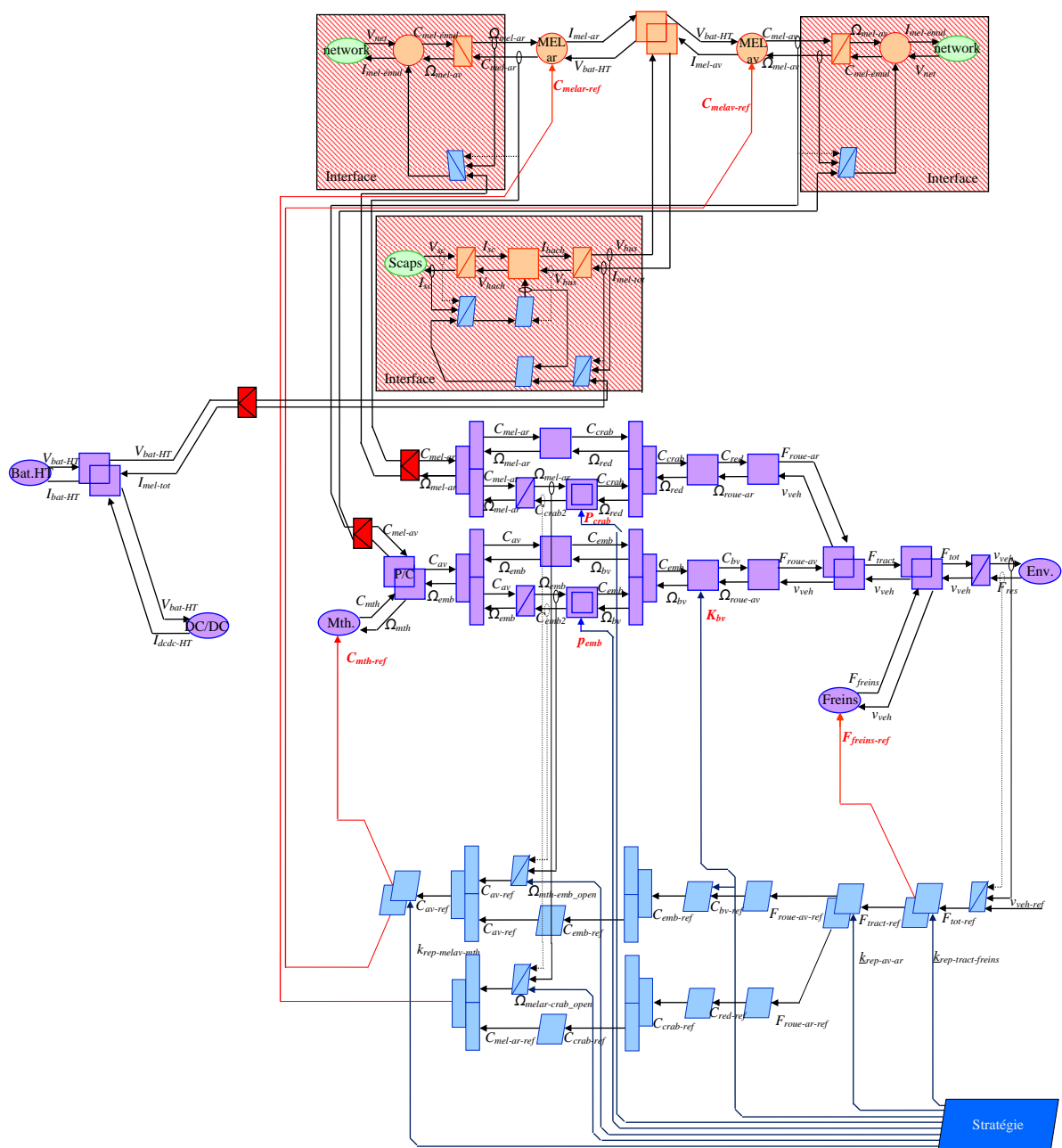


Figure 98 REM et commande par inversion de l'émulation complète

Simulation de la «simulation HIL» – Un environnement de test a été réalisé dans le but de tester le système en simulation avant de l'implanter dans la carte microcontrôleur dSPACE. La REM globale, comprenant les différentes émulations faites précédemment (Figure 98) est directement implantable dans le logiciel MATLAB-Simulink (à droite de la Figure 99). Le bloc bleu (à gauche de la Figure 99) est le seul bloc qui sera repris lors de la «simulation HIL». Les autres blocs étant la simulation de la plateforme de test.

Remarque : Lors des précédentes REM élaborées, les machines électriques étaient représentées en utilisant des modèles quasi-statiques. Dans le cadre d'une «simulation HIL», les modèles quasi-statiques doivent être remplacés par des modèles dynamiques. Leurs commandes sont effectuées en utilisant les règles d'inversion de la REM.

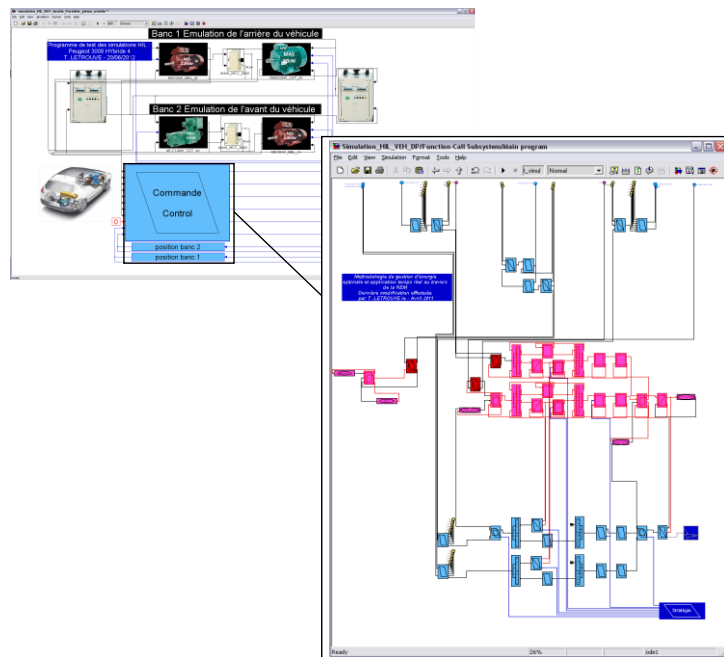


Figure 99 Simulation effectuée sous MATLAB-Simulink

Cette simulation a prouvé le bon fonctionnement de la commande globale ainsi que les différents modes de fonctionnement qui seront visibles lors de la «simulation HIL». Cette simulation a également validé les commandes locales des nouvelles machines électriques : machine à courant continu de 14 kW, machine asynchrone à cage de 20 kW et deux machines synchrones à aimants permanents de 10 kW et 20 kW.

III.3.b. Résultats d'expérimentation

«Simulation HIL» pleine échelle du véhicule étudié – La «simulation HIL», ainsi réalisée, sera effectuée sur la plateforme décrite précédemment (Figure 93). Cette émulation temps réel sera effectuée sur un cycle ECE-15. La mise en œuvre de cette plateforme a nécessité un temps important de développement. En effet, plusieurs difficultés liées à la mise en place d'une plateforme ayant une puissance quasiment 10 fois supérieure à la plateforme précédente ont nécessité des changements : limitation en ampérage de la salle eV à augmenter,

l'augmentation de la puissance a eu un impact non négligeable sur la sensibilité électromagnétique des capteurs et surtout les codeurs incrémentaux des machines synchrones. Toutes ces modifications ont eu un impact sur le temps de développement de ce banc. Cependant, une fois ces aspects résolus, la mise en place de la « simulation HIL » pleine échelle a été très rapide grâce au travail réalisé sur la « simulation HIL » à échelle réduite.

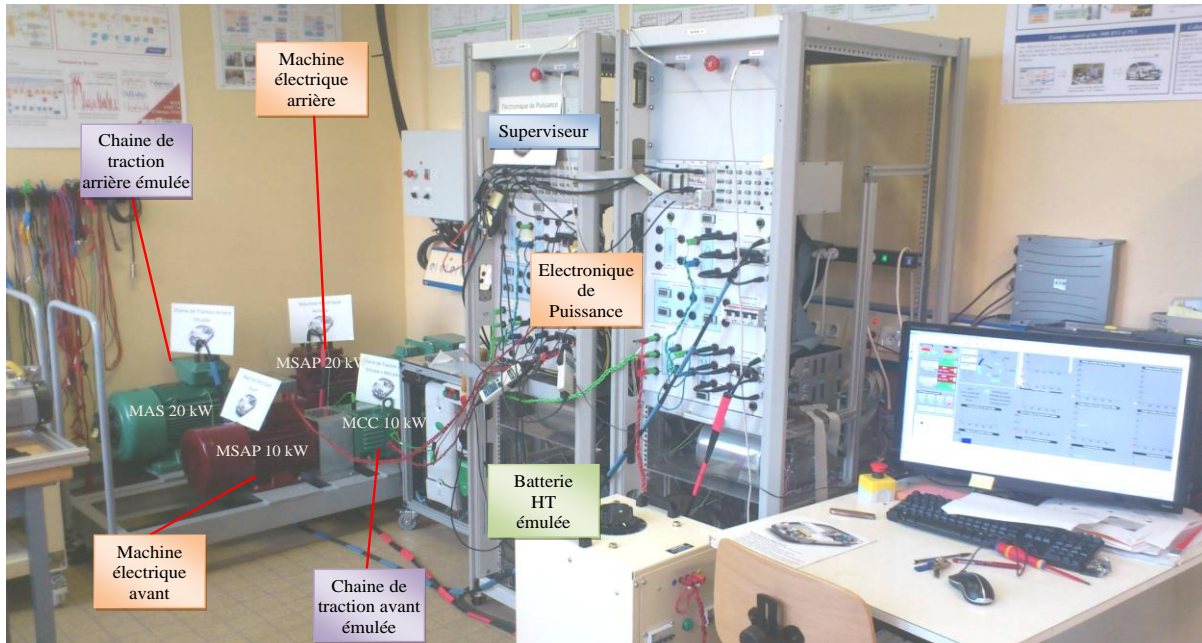


Figure 100 Plateforme utilisé pour effectuer l'émulation pleine échelle

Les machines utilisées ne peuvent pas aller à la même vitesse que les machines dans le véhicule réel. Un coefficient d'adaptation sur la vitesse sera donc conservé (Figure 101). Le couple et la tension seront quant à eux à pleine échelle. Les puissances des machines représentant les machines du véhicule sont identiques.

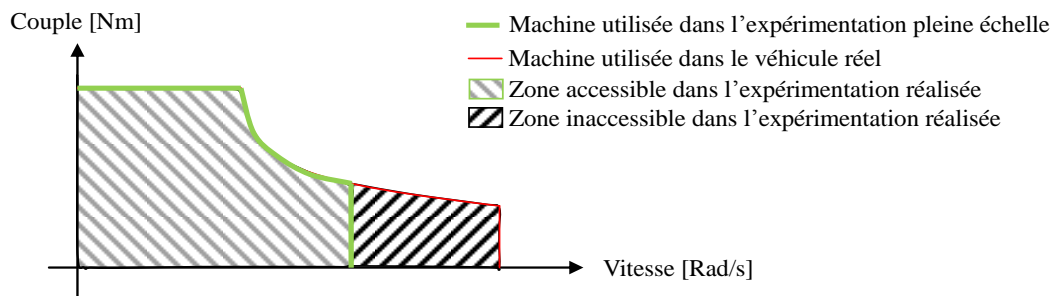


Figure 101 Différence entre la machine électrique réelle et expérimentale sur la courbe couple-vitesse

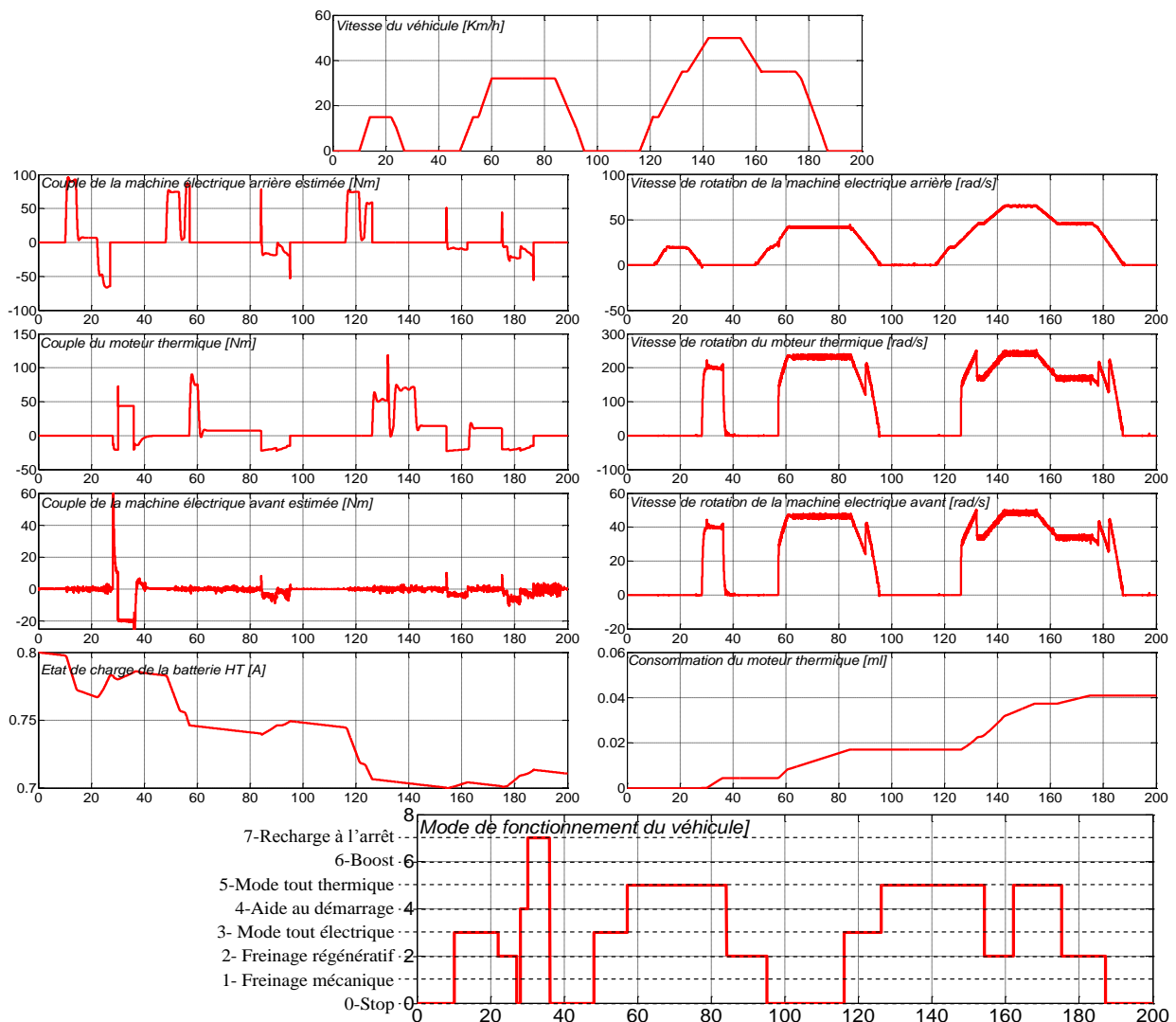
Résultats de simulation – Les résultats de simulation (Figure 102) montrent les différents modes de fonctionnement du véhicule lors d'un cycle ECE. Lors de ce cycle, 3 trapèzes de vitesse (15 km/h, 30 km/h, 50 km/h), sont demandés par le conducteur. L'objectif de cette simulation est de vérifier si notre commande est implantable en temps réel et de voir le comportement du véhicule au travers des différents modes de fonctionnement étudiés.

Lors du premier trapèze de vitesse, l'état de charge de la batterie haute tension étant à un niveau convenable, le couple demandé est entièrement dispensé par la machine électrique

arrière. Lors de la phase de freinage la batterie haute tension se recharge via la machine électrique arrière. Entre les deux trapèzes de vitesse, une recharge à l'arrêt est effectuée. En utilisant tout d'abord la machine électrique avant pour démarrer le moteur thermique puis en le stabilisant à une vitesse. Il fournira ensuite le couple de recharge à la machine électrique avant qui rechargera la batterie électrique haute tension.

Lors du deuxième trapèze de vitesse, la première accélération est effectuée par la machine électrique, le moteur thermique prendra ensuite le relais pour fournir le couple permettant de suivre la consigne. L'embrayage étant ouvert lors de la phase de freinage, la récupération d'énergie peut se faire par la machine électrique avant et la machine électrique arrière. Le dernier trapèze de vitesse, est équivalent au deuxième.

Un couple négatif est visible sur le moteur thermique émulé lorsque le véhicule freine et que l'embrayage est fermé. Ce couple correspond au couple de trainée du moteur thermique. La récupération d'énergie générale (axe avant et arrière) est donc diminuée à cause de ce couple.



III.4. Conclusion

Dans le chapitre précédent (cf. Chapitre II), la simulation du véhicule étudiée et de la commande déduite par inversion de la REM a permis de valider le bon fonctionnement de la commande dans un environnement complètement connu et où les temps de calcul sont maîtrisés et finalement peu important.

Une «simulation HIL» est un programme de simulation dans lequel on va incorporer une partie physique du système. Dans notre étude, les machines seront connectées à des systèmes qui vont imposer le même comportement que les transmissions mécaniques. Dans la « simulation HIL » ainsi réalisée, les modèles des machines, utilisés en simulation, sont remplacés par des machines réelles. Les modèles des tractions mécaniques sont gardés pour piloter les sous-systèmes considérés. Ces « simulations HIL » seront dénommées : « simulation HIL » type puissance. Les objectifs de ce type de «simulation HIL» sont multiples : tout d'abord elle permet de valider directement les modèles des machines utilisés en simulation. Elle permet aussi de tester les machines électriques utilisées dans un environnement proche de celui du véhicule. Enfin, cette «simulation HIL» permettra de valider la portabilité en temps réel de la commande développée dans le chapitre précédent.

Deux échelles d'émulation temps réel ont ici été effectuées. L'échelle réduite a été très rapide à mettre en œuvre. En effet, l'utilisation d'un banc d'expérimentation complètement connu, et qui n'est pas dédié à une application, a permis de valider la portabilité temps réel et les différents modes de fonctionnement très rapidement. La mise en place d'une plateforme pleine échelle a été plus longue : le dimensionnement du matériel nécessaire, l'élaboration des algorithmes de commande des nouvelles machines, l'augmentation en puissance d'une plateforme, prise en compte de l'aspect CEM ne sont pas des étapes à négliger dans les phases de développement. La même commande que celle élaborée dans la simulation a été utilisée dans ce chapitre. La REM a permis d'organiser rapidement les différentes parties de la « simulation HIL » : émulation, commande, stratégie, interface. Après la validation des deux « simulations HIL » effectuées dans ce chapitre, l'intérêt de chacune d'entre elles par rapport à l'étape précédente (la simulation) et à l'étape suivante (l'expérimentation sur véhicule) sera discuté dans le chapitre IV.

Après la validation de la portabilité en temps réel de la commande, la prochaine validation de cette commande sera effectuée sur un véhicule prototype (Chapitre IV).

Chapitre 4 : Validation sur prototype et discussions

Résumé du chapitre 4

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une analyse sur le niveau d'étude nécessaire (simulation, émulation, test sur prototype) pour développer la commande d'un véhicule hybride. La première partie de ce chapitre portera sur la portabilité de la commande développée dans le chapitre II sur un véhicule prototype disposant de l'architecture HYbrid4, la facilité d'implémentation de la commande grâce aux étapes précédentes et la différence entre le véhicule prototype et le véhicule de série. Suite à l'implantation de la commande basée sur l'inversion de la REM sur prototype, l'expérimentation réalisée sera répétée sur les étapes précédentes (« simulation HIL », simulation). Une discussion sur les intérêts des différentes étapes s'en suivra.

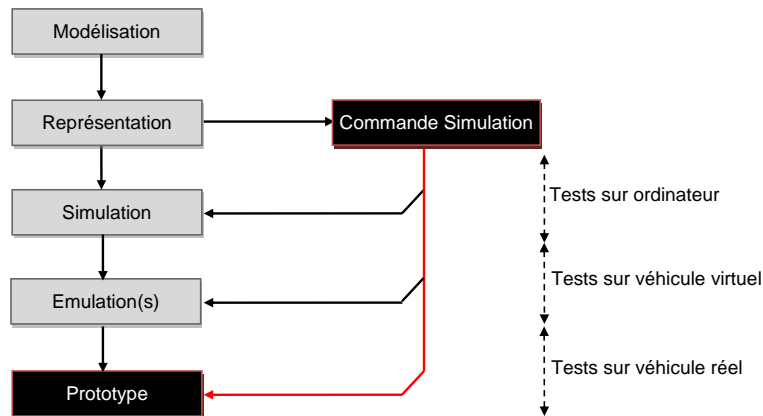


Figure 103 Schématisation de la partie testée dans ce chapitre

Plan du chapitre 3

IV.1. Véhicule prototype.....	104
IV.1.a. Architecture de commande	104
IV.1.b. Architecture de puissance	109
IV.2. Expérimentation sur véhicule prototype	111
IV.2.a. Couplage SMC – Commande prototype	111
IV.2.b. Résultats d'expérimentation	118
IV.3. Intérêt des différentes étapes	122
IV.3.a. Comparaison des résultats	122
IV.3.b. Discussion sur les différentes étapes	127
IV.1. Conclusion	133

IV.1. Véhicule prototype

Avant d'implémenter notre commande sur le prototype, une analyse de ce dernier est nécessaire. Dans un premier temps, les architectures logicielle et matérielle des organes de commande sont présentées. Dans un second temps, l'architecture du système de traction est présentée.

IV.1.a. Architecture de commande

Electrification des véhicules

Aujourd'hui, « l'Electricité », au sens général du terme, est de plus en plus présente dans les véhicules. En effet, plusieurs aspects liés à l'automobile sont améliorés en utilisant l'électricité. Comme expliqué dans le chapitre 1, l'électrification de la traction permet non seulement d'augmenter l'agrément de conduite en fournissant, par exemple, au conducteur la suppression des ruptures de couple dû aux changements de rapport mais aussi d'avoir une réduction significative de la consommation et des émissions de polluants. Dans l'automobile, d'autres électrifications sont intégrées ou en cours d'intégration [Krug 1997] :

- la technologie appelée X-by-Wire, dont l'objectif est de remplacer les actionneurs présents dans le véhicule par des actionneurs entièrement contrôlable électromécaniquement (par exemple : réglages des sièges et des rétroviseurs électriquement, système de chauffage, direction assistée, etc.),
- l'augmentation des accessoires de confort : climatisation, ordinateur de bord, etc.
- l'augmentation des éléments sécuritaires : autodiagnostic, qui permet à tout instant de savoir si le système est opérationnel et si aucune faille n'est visible, la visibilité et la signalisation, avec, par exemple, l'ajout de feu diurne permettant une meilleure visibilité de jour, l'antiblocage de sécurité (ABS), l'électro-stabilisateur programmé (ESP), etc.
- l'augmentation des éléments liés à la communication externe au véhicule : radio, téléphone, navigation embarquée, etc.

L'augmentation de ces différentes fonctions a sensiblement augmenté les risques de défauts entre les différents calculateurs mais aussi la longueur du câblage présent dans les véhicules. En effet, dans les années 1960, les câblages présents dans le véhicule étaient de 200 m pour arriver à près de 2 km dans les années 1995 [Beretta 2007] (Figure 104). Des modifications de l'architecture électrique dans le véhicule ont dû être réalisées.

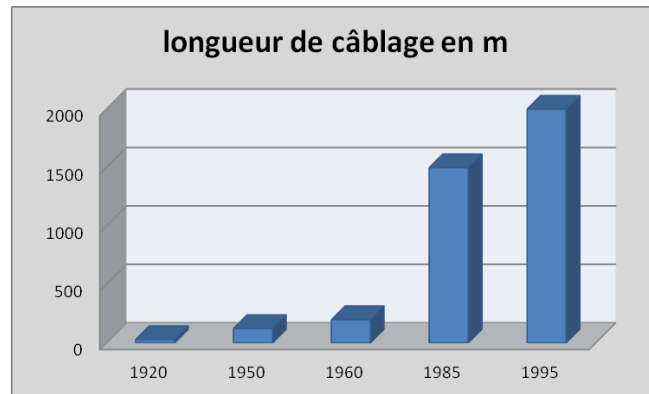


Figure 104 Evolution de la longueur de câblage dans une voiture particulière [Beretta 2007]

Architecture électronique d'un véhicule

L'augmentation de ces nouvelles fonctions engendre naturellement l'augmentation des calculateurs présents dans le véhicule. Avant les années 1980, les calculateurs des fonctions secondaires étaient tous reliés à un calculateur central (Figure 105) qui permettait de recevoir les informations des différents calculateurs et de leur envoyer des ordres. Si un calculateur était ajouté, on se contentait de rajouter des nouvelles connections sans se soucier de celles déjà existantes. L'inconvénient de cette architecture est que, si le calculateur central est mis en défaut, les autres calculateurs sont affectés. Une première évolution a donc été d'ajouter un aspect système au calculateur : chaque calculateur ne communique plus avec seulement le calculateur principal mais est en charge d'une fonction et, pour cela, il est directement connecté aux autres calculateurs nécessaires à son bon fonctionnement.

La dernière évolution, qui date des années 1980, consiste à remplacer les commandes et mesures filaires entre les différents calculateurs par un bus multiplexé permettant de faire transiter toutes les informations sur un bus. De ce fait, les informations nécessaires à tous les calculateurs sont données sur ce bus, à eux de choisir les données dont ils ont besoin. Cette technologie est appelée : bus CAN (Controller Area Network) [Bosch 1991] [Xing 1999]. L'inconvénient d'une telle démarche réside dans l'utilisation de matériel mis à disposition par les équipementiers. L'utilisation du même protocole est donc nécessaire.

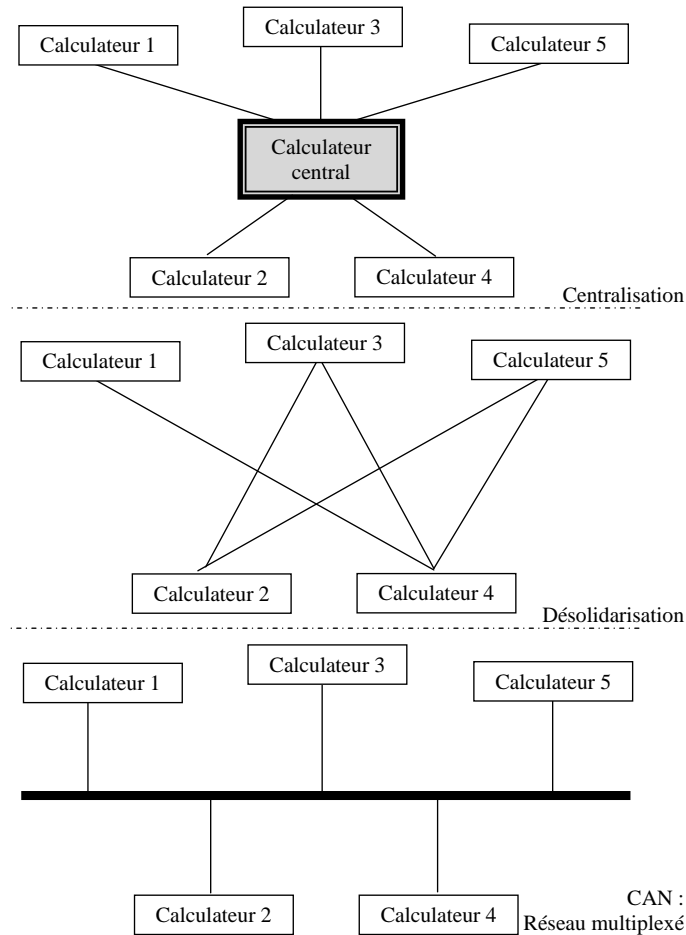


Figure 105 Evolution de l'architecture électrique d'un véhicule

Par exemple, si l'on regarde le câblage d'un optique arrière (Figure 106), on peut remarquer que la mise en bus CAN permet de relier plus facilement et de manière plus structurée toutes les informations nécessaires à l'optique. En effet, un optique arrière est composé de 5 éléments : clignotants, feux de position, feux de stop, feux de recul et feux antibrouillard. L'état de ces feux est dépendant de plusieurs éléments du poste de conduite : la commande des phares, la commande du clignotant, la pédale de frein et la boîte de vitesse. Avant le réseau CAN, chaque feu était relié à l'élément qui le commandait (exemple : boîte de vitesse pour les feux de recul). Depuis le bus CAN, tous les éléments renvoient leurs états sur le bus, les feux récupèrent les informations en provenance des éléments dont ils ont besoin pour leurs fonctionnements.

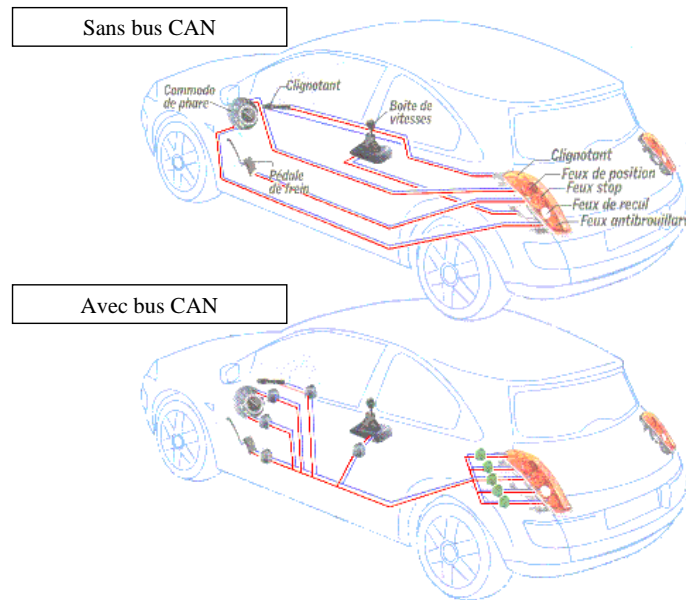


Figure 106 Exemple du câblage d'un optique arrière avec et sans le bus CAN

L'apparition des réseaux CAN a permis l'indépendance des différents calculateurs présents dans un véhicule. La modification d'un calculateur est donc beaucoup plus aisée de ce fait. Les différentes informations nécessaires à notre commande sont donc issues du bus CAN. Ce qui implique une mise en forme spécifique : une interface de mise en forme est nécessaire. Il en est de même pour les sorties de notre commande qui doivent être mises en forme par rapport au protocole du bus CAN.

Dans le véhicule étudié, la gestion de l'énergie est effectuée via un calculateur nommé PTMU (PowerTrain Management Unit). Ce calculateur nécessite plusieurs informations du bus CAN et envoie plusieurs commandes sur celui-ci à destination des différents calculateurs. Différentes entités communiquent avec le PTMU :

- le BSI : Boîtier de Servitude Intelligent, ce boîtier est au cœur des réseaux CAN. Il joue le rôle de coordinateur et de passerelle CAN entre les différents systèmes de sécurité, d'aide à la conduite, de diagnostic, etc.
- les Capteurs filaires. Certains capteurs analogiques ou numériques ne passent pas par un calculateur avant d'être multiplexés sur le bus CAN mais y sont directement connectés (exemple : position de la clé de contact, palette de réglage de la vitesse du régulateur, etc.).
- le boîtier « leurrage » pédale. Il permet de fournir au PTMU les différentes informations concernant l'état des pédales (accélérateur et frein) et de leurs alimentations.
- le SEEM : Sous-Ensemble Electro-Moteur, cette entité est composée de la commande des différents organes électromécaniques : la batterie haute tension, les machines électriques avant et arrière, le convertisseur DC/DC.

- le CMM : Calculateur Multifonction Moteur, ce calculateur a pour objectif de commander les différents paramètres liés au moteur thermique (exemple : l'injection de carburant, le traitement des émissions à l'échappement, etc.).
- la MCP : Mécanique Compact Pilotée, cette entité permet de commander toutes les données en provenance de la boîte de vitesse robotisée et de l'embrayage avant.
- l'ESP : Electro-Stabilisateur Programmé, est un élément permettant de stabiliser le véhicule en cas de perte d'adhérence.

Notre commande sera implémentée dans le PTMU, la mise en évidence des différents calculateurs connectés au PTMU via le bus a permis de connaître les moyens qu'a ce calculateur pour communiquer avec les organes du véhicule. Il est donc important de comprendre ce qui équivaut, dans le programme original, à la commande réalisée par l'inversion de la REM réalisée dans le chapitre II.

Architecture du logiciel de commande

L'architecture du logiciel présent dans le PTMU peut être découpée en plusieurs sous-fonctions (Figure 107):

- La première sous-fonction est nommée Sécurités et limitations. Elle rassemble et remet en forme toutes les informations sur l'état, les sécurités et les limitations des organes.
- En fonction d'un mode de fonctionnement choisi par la sous-fonction « choix mode », les différentes commandes rapprochées des organes ainsi que des stratégies associées sont activées. Les différents modes de fonctionnement disponibles sont :
 - contrôle technique : ce mode permet de tester le bon fonctionnement des organes lors d'un contrôle technique,
 - hors roulage : ce mode concerne l'état des organes lorsque le véhicule n'est pas dans un mode de roulage,
 - roulage : ce mode concerne la commande des organes lorsque le véhicule est en mode de roulage. Ce mode est comparable à la commande élaborée lors du Chapitre II,
 - recharge à l'arrêt : ce mode permet de recharger la batterie haute tension sans être en mode de roulage. Il est important pour pouvoir tester la stratégie de gestion de l'énergie dans plusieurs états de charge initiale,
 - plug-in : ce mode permet de recharger le véhicule via une prise secteur.
- Un bloc « Adaptations Organe » permet de mettre en forme les différents signaux de sortie pour qu'ils puissent être directement lus par les organes cibles.

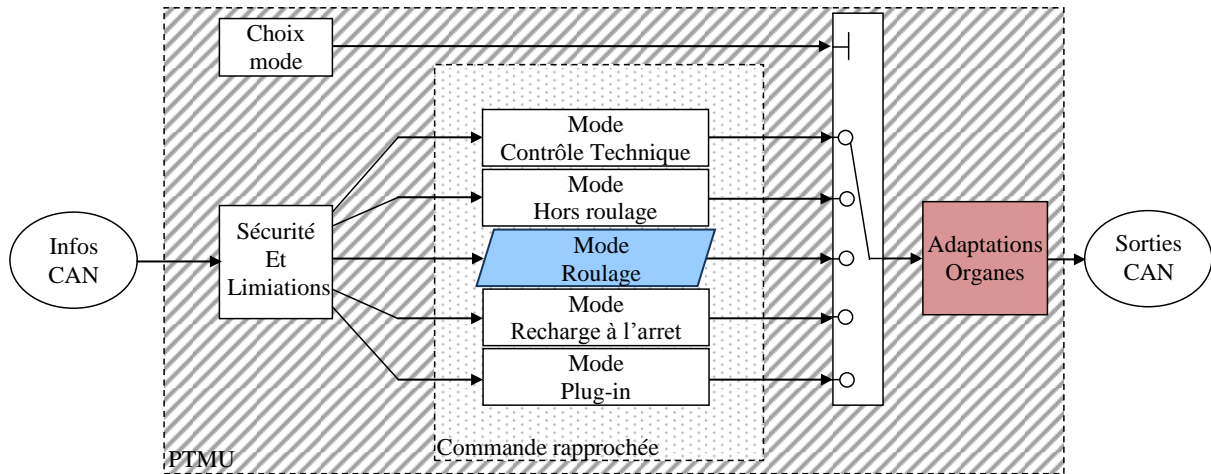


Figure 107 Architecture du PTMU actuellement implantée dans le véhicule

La commande réalisée dans le chapitre II ne fonctionne que pour le mode roulage et à vocation à remplacer la commande actuellement dans ce bloc.

IV.1.b. Architecture de puissance

Architecture mécanique du véhicule étudié

Le véhicule prototype ainsi utilisé est une Peugeot 308 HYPI (HYbride Plug-In) (Figure 108) disposant d'une architecture Hybrid4 et d'une batterie Li-ion d'une réserve énergétique adaptée à une véhicule hybride plug-in (10 MJ). L'architecture et l'implantation des différents organes dans une Peugeot 308 est disponible Figure 108. Le véhicule prototype dispose de quelques différences avec le véhicule de série (Tableau 7) :

- le véhicule prototype dispose d'une batterie Li ion disposant d'une grande réserve d'énergie, par rapport au véhicule de série qui a une batterie NiMh de plus faible énergie,
- le véhicule prototype dispose d'une machine électrique arrière PARVEX de 20 kW, le véhicule de série d'une machine électrique Bosch de même puissance,
- le véhicule prototype dispose d'une machine électrique avant Continental de 7 kW, comparé à la machine électrique Bosch de même puissance,
- le moteur thermique du véhicule prototype est un DV6T (1,6 L HDI), le moteur thermique du véhicule de série est un DW10 (2,0 L HDI),
- le véhicule prototype dispose d'un embrayage à la place du crabot permettant le découplage du GMP arrière.

Tableau 7 Différences entre le véhicule de série et le véhicule prototype

	Véhicule de série	Véhicule prototype
Batterie	NiMh plus faible réserve énergétique	Li-ion forte réserve énergétique
Machine électrique arrière	MSAP Bosch : 20 kW	MSAP Parvex : 20 kW
Machine électrique avant	MSAP Bosch : 7 kW	MSAP Continental : 7 kW
Moteur thermique	DW10 : 2,0 L HDI	DV6T : 1,6 L HDI
Organe de découplage arrière	Crabot	Embrayage

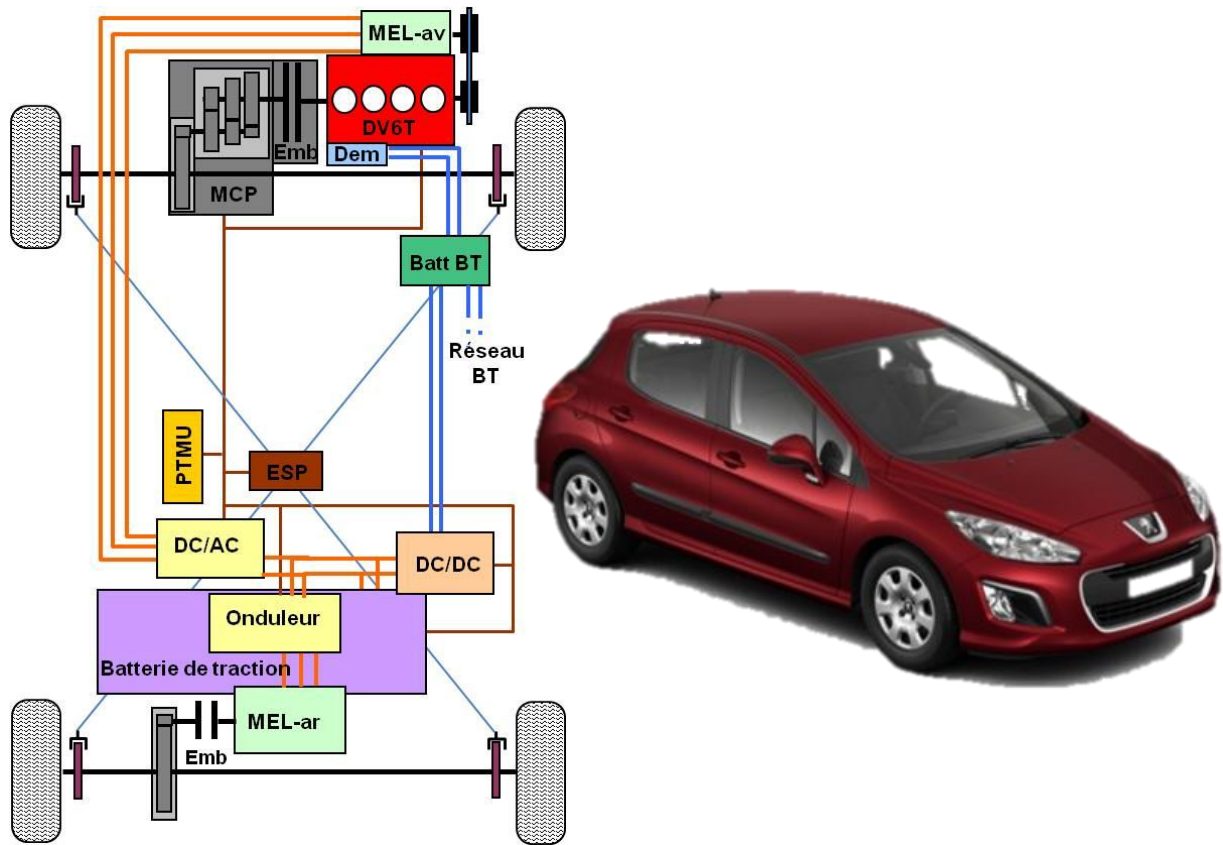


Figure 108 Architecture de puissance du véhicule prototype : 308 HY4-Plug In

La commande développée dans les chapitres précédents doit donc être adaptée en utilisant les paramètres des différents organes composant le véhicule prototype. Il est donc impératif de modifier les différents gains et de recalculer les différents correcteurs. En revanche, la structure de la commande initiale reste la même.

IV.2. *Expérimentation sur véhicule prototype*

L'objectif de cette section est d'incorporer la commande systématique déduite de la REM dans une MicroAutoBox de dSPACE remplaçant le PTMU sur le prototype. Pour cela, certaines modifications de la commande issue de la REM doivent être effectuées. L'incorporation dans le programme original nécessite une compréhension de celui-ci : la commande élaborée ne devant pas interférer avec les parties dont elle ne tient pas compte mais seulement la partie de logiciel indiqué Figure 107 (mode roulage). Enfin, plusieurs expérimentations sont réalisées sur un parcours de roulage sécurisé de PSA Peugeot Citroën au sein du centre technique de Carrières-sous-Poissy.

IV.2.a. Couplage SMC – Commande prototype

Modification apportée à la commande issue de la REM

Correcteur représentant le conducteur – En simulation, le conducteur est remplacé par un correcteur de vitesse. En effet, le conducteur regarde la vitesse du véhicule sur le compteur et modifie son appui pédale en fonction de la consigne qu'il veut suivre. Le conducteur réalise donc un asservissement de vitesse (correcteur de type neuronal) pour délivrer une force de référence en appuyant sur les pédales. Dans un véhicule réel, ce correcteur n'a plus de raison d'être. Le conducteur dispose de plusieurs moyens d'action (Figure 109) qui agissent soit sur la consigne de force soit sur la stratégie de gestion de l'énergie :

- ① la position de la molette de sélection du mode de fonctionnement : « ZEV » pour forcer le fonctionnement en roulage tout électrique, « AUTO » pour fournir au conducteur un compromis entre performance, confort de conduite et consommation, « SPORT » pour axer la stratégie sur les performances de la voiture, « 4WD » pour faire fonctionner la machine électrique arrière et le moteur thermique en même temps (mode 4x4). Cette molette ne va pas agir directement sur la commande mais sur la stratégie de gestion de l'énergie.
- ② la position du levier de vitesse : « P » (Park) lorsque la voiture est garée, « R » pour Reverse pour enclencher la marche arrière, « N » (Neutral) pour mettre la boîte de vitesse au point mort, « D » (Drive) pour conduire la voiture en mode roulage. Ce levier va agir sur la commande (exemple : position de l'embrayage, etc.) et sur la stratégie de gestion de l'énergie (exemple : autorisation des recharges à l'arrêt, etc.).
- ③ l'appui sur les pédales d'accélérateur et de freins. Ces pédales vont agir sur la commande (commande en force du véhicule) et sur la stratégie de gestion de l'énergie (exemple : demande de force important, récupération d'énergie, etc.)



Figure 109 Action conducteur sur le véhicule ① Sélection du mode, ② Boîte de vitesse, ③ Pédales d'action

Une nouvelle fonction doit donc être ajoutée pour faire le lien entre les actions du conducteur citées précédemment et la commande en couple nécessaire à la commande basée sur l'inversion de la REM. Cette fonction est bien connue chez PSA Peugeot Citroën. Elle se nomme : IVC (Interprétation Volonté Conducteur). La force de référence provenant de cette interprétation est une interprétation de la position de la pédale d'accélération (Figure 110). Les forces de résistance à l'avancement dépendant du carré de la vitesse, la force de référence provenant de l'IVC sera naturellement dépendante de la vitesse. Cette matrice dépendra naturellement du mode de fonctionnement choisi par le conducteur : si le conducteur a choisi le mode ZEV, la matrice ne sera pas effectuée en dehors de la plage d'utilisation de la machine électrique arrière ($v_{veh-max-elec}=100$ km/h) (Figure 110). Une limitation de la force demandée pourrait aussi être effectuée et permettrait de rendre le système moins énergivore pendant les phases d'accélération.

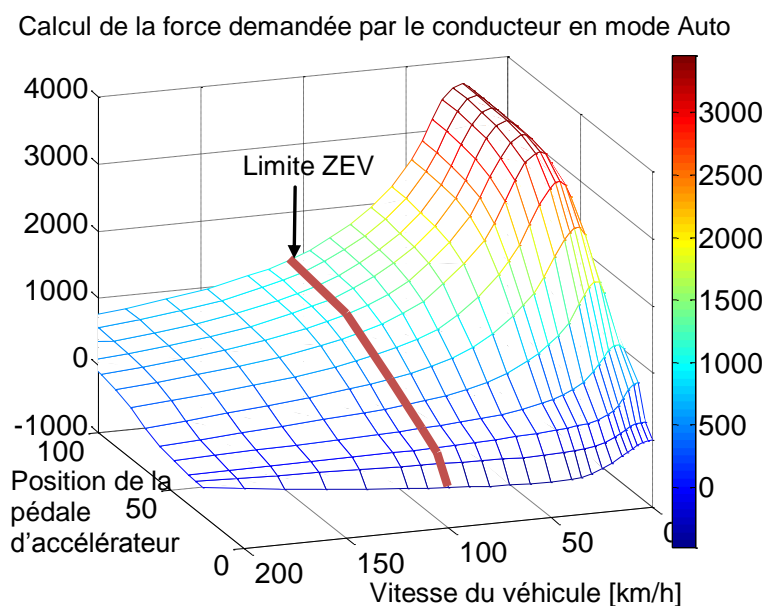


Figure 110 Force à la roue calculée par l'IVC dans le cadre d'un mode AUTO et identification de la limite ZEV

Gestion des commandes de la boîte de vitesse et de l’embrayage – La boîte de vitesse étant robotisée, la totalité des informations de commande de ces organes ne provient pas de la structure de commande systématique mais de la partie apparentée à la stratégie. La gestion de la boîte de vitesse et de l’embrayage est donc reprise du programme original (PTMU) et ne sera pas modifiée.

Interface d’adaptation – Une interface d’adaptation doit être mise en place car les informations en provenance du bloc « sécurité et limitation » ne sont pas toujours au format utilisable par la commande élaborée. De plus, les données nécessaires aux différents organes présents dans le véhicule ne sont pas forcément directement celles provenant de la commande élaborée.

Gestion des freins mécaniques – Contrairement à ce que la structure de commande déduite de la REM faisait en simulation, sur le prototype elle ne gère pas la force de freinage demandée aux freins mécaniques. En effet, le bloc ESP, présent dans le véhicule, va lui-même gérer le freinage mécanique (Figure 111). Ce bloc va permettre de répartir le freinage mécanique de façon à garantir la stabilité du véhicule quel que soit les couples effectués par les GMP avant et arrière.

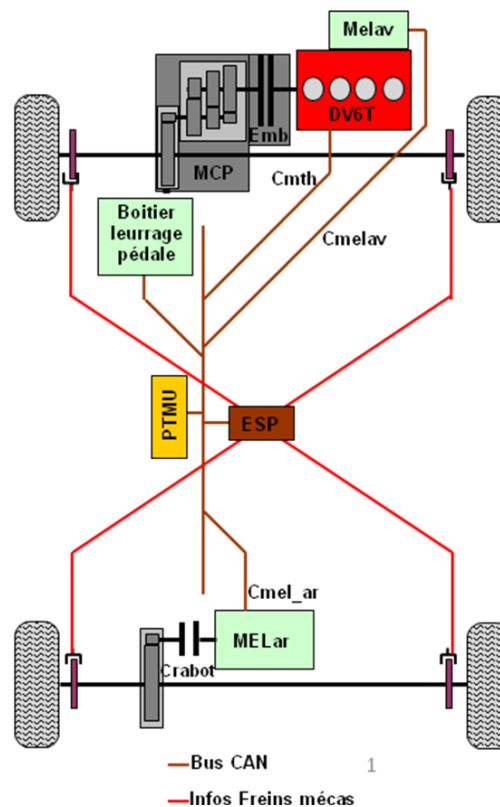


Figure 111 Synoptique de la gestion des freins mécaniques

Suite aux différentes modifications présentées précédemment, la commande modifiée a été représentée Figure 112. Cette structure de commande est identique à la structure de commande effectuée dans le chapitre II. Les deux différences majeures proviennent de l’Interprétation de la Volonté du Conducteur (IVC) et de la mise en place de la stratégie PSA

qui contrôle l’embrayage, la boîte de vitesse et les demandes de démarrage du moteur thermique. Cette stratégie agira donc sur la stratégie de gestion de l’énergie réalisée dans les chapitres précédents. (Remarque : pour ne pas surcharger le schéma les interfaces d’adaptation n’ont pas été représentées).

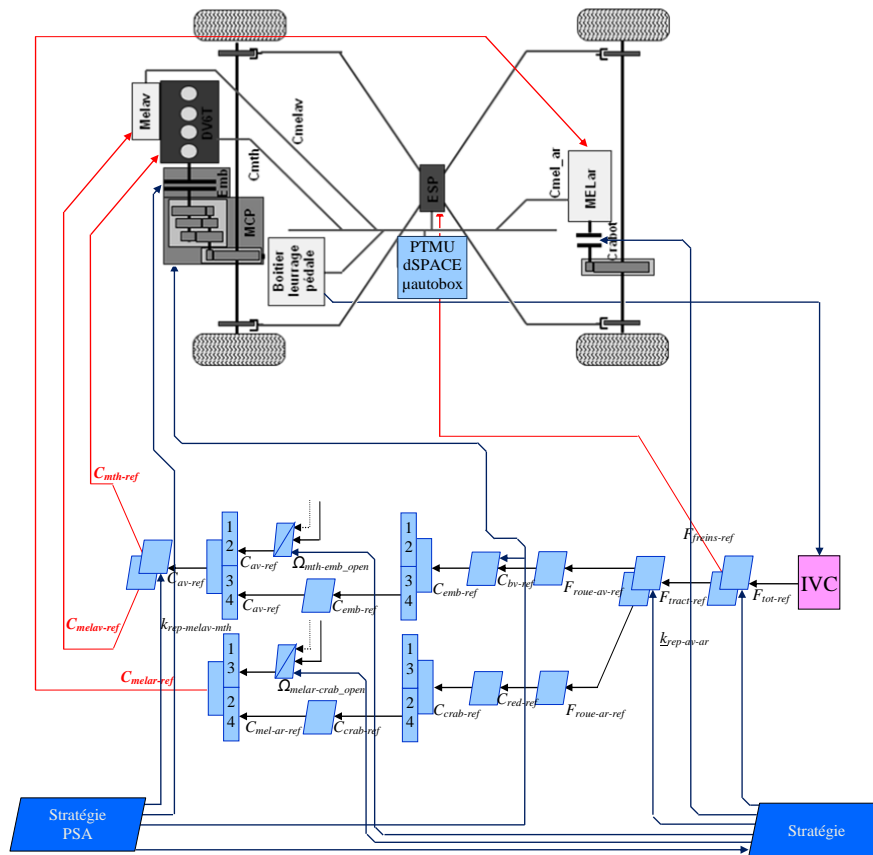


Figure 112 Structure de commande suite aux modifications effectuées pour l’implémentation véhicule

Incorporation dans le PTMU original

Cheminement pour l’incorporation de la commande élaborée - Pour incorporer la commande issue de la REM dans le programme original (PTMU), plusieurs étapes sont à effectuer. La Figure 113 explique le cheminement : lors de tests de validation finale effectués sur le véhicule par PSA Peugeot Citroën des trames d’acquisitions en entrée et en sortie du PTMU ont été enregistrées. Les trames d’acquisitions d’entrée ont été ensuite utilisées lors de la simulation du PTMU en boucle ouverte puis les variables en sortie de la simulation ont été comparées avec les trames d’acquisition de sortie. Ensuite, la dernière étape était de remplacer la partie correspondante (appelée chez PSA/DRIA structure couple) par la commande élaborée à partir de l’inversion de la REM, tout en y ajoutant des interfaces signaux. Cette commande a ensuite été implantée dans le véhicule.

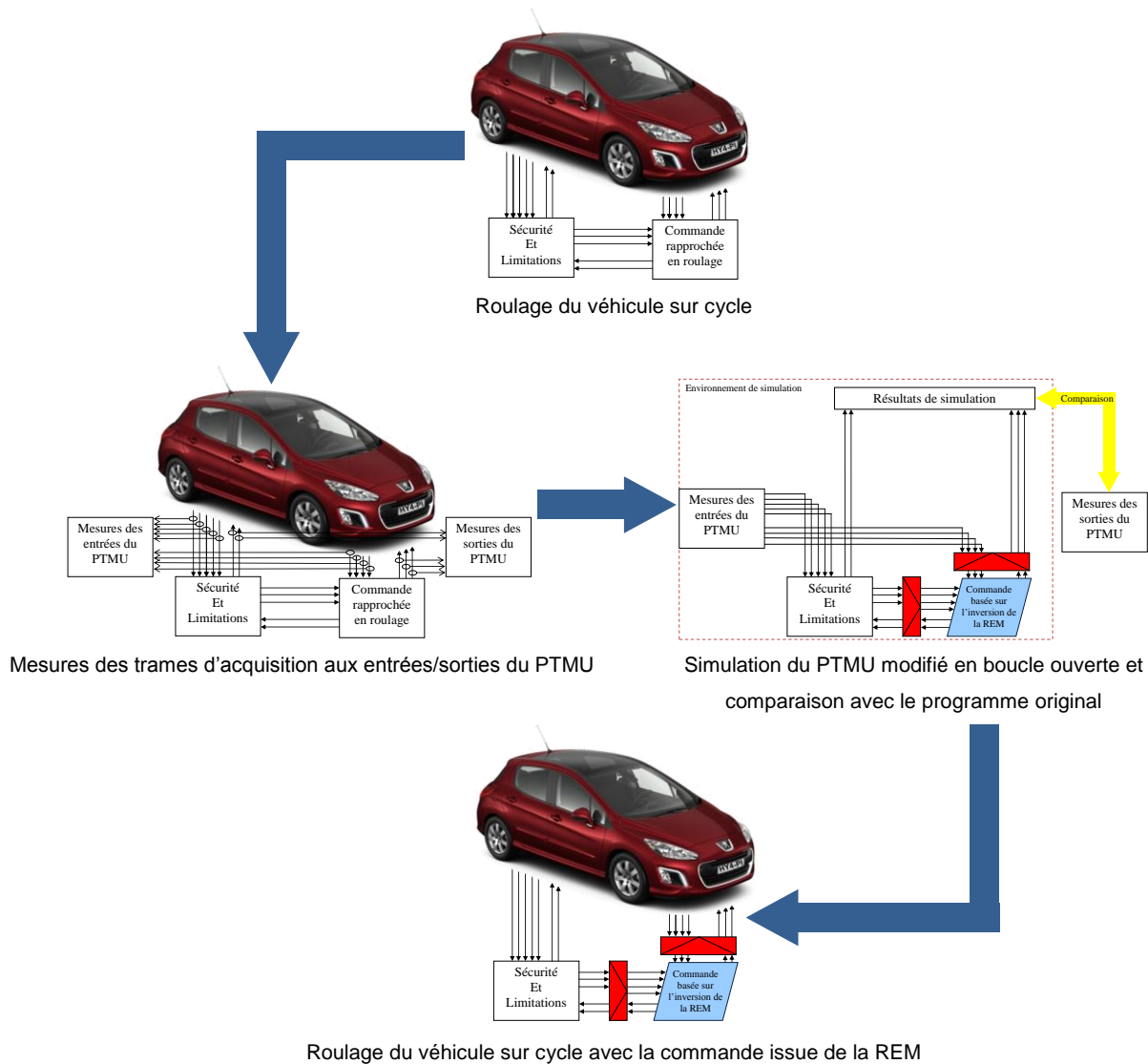


Figure 113 Etape de l'élaboration du PTMU modifié avec la commande déduite de la REM

Simulation du PTMU en boucle ouverte - Une simulation en boucle ouverte sur un cycle connu a donc été effectuée. Celle-ci est apparue comme essentielle pour comprendre le PTMU et pour effectuer des premiers tests.

Trame d'acquisition choisie - Une trame d'acquisition a été choisie pour ses nombreux modes de fonctionnement testés. Lors d'une première phase, le véhicule fonctionne en mode tout électrique : seule la machine électrique arrière fournit de la puissance. Ensuite, l'embrayage se ferme pour permettre au moteur thermique de fournir un boost à la machine électrique. Lorsque le moteur thermique est allumé, et qu'un changement de rapport est présent, la machine électrique arrière donne de la puissance pour éviter les sensations de rupture de couple pour le conducteur.

La stratégie utilisée dans ce programme a été développée pour un véhicule hybride plug-in. Il est donc normal qu'elle n'essaie pas de conserver un état de charge constant mais plutôt qu'elle cherche à décharger la batterie complètement. Lors des tests, l'état de charge était décomposé en 2 : un état de charge dit « plug-in » où la stratégie fonctionne en charge

« depleting » [Trigui 2011] [Raghavan 2012] et un état de charge où le véhicule fonctionne en mode de charge « sustaining ». Dans les résultats d'expérimentation, seul l'état de charge réel de la batterie haute tension apparaîtra.

Insertion de la commande élaborée dans le PTMU - Avant d'insérer la commande systématique issue de la REM, il était nécessaire de savoir où se trouvait la coupure entre le bloc « sécurité et limitations » et le bloc correspondant à la commande rapprochée et à la stratégie. La compréhension et l'exploration du programme original (Figure 114) a donc été une étape importante.

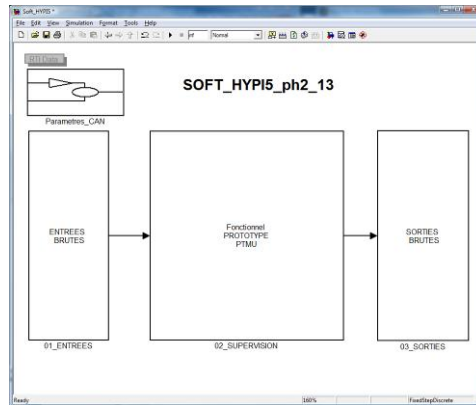


Figure 114 Soft PTMU Originel

Il est apparu que la SMC et la stratégie, s'apparente à la « structure couple » en mode roulage. L'ensemble commande issue de la REM et interface signal doit donc fournir les sorties de cette fonction.

Pour des raisons pratiques, la commande issue de la REM a été implantée de manière indépendante, de telle façon qu'à tout moment la commande originelle puisse être réutilisée. La Figure 115 montre l'implantation réalisée sous forme de schéma bloc. La commande, identique à celle effectuée dans le chapitre II, est implémentée dans le logiciel MATLAB / Simulink (Figure 116).

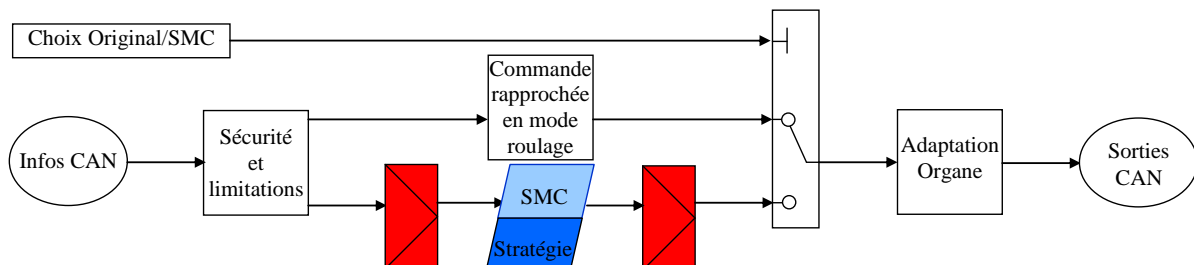


Figure 115 Schéma de l'implémentation de la SMC dans le soft et mise en avant de la parallélisation

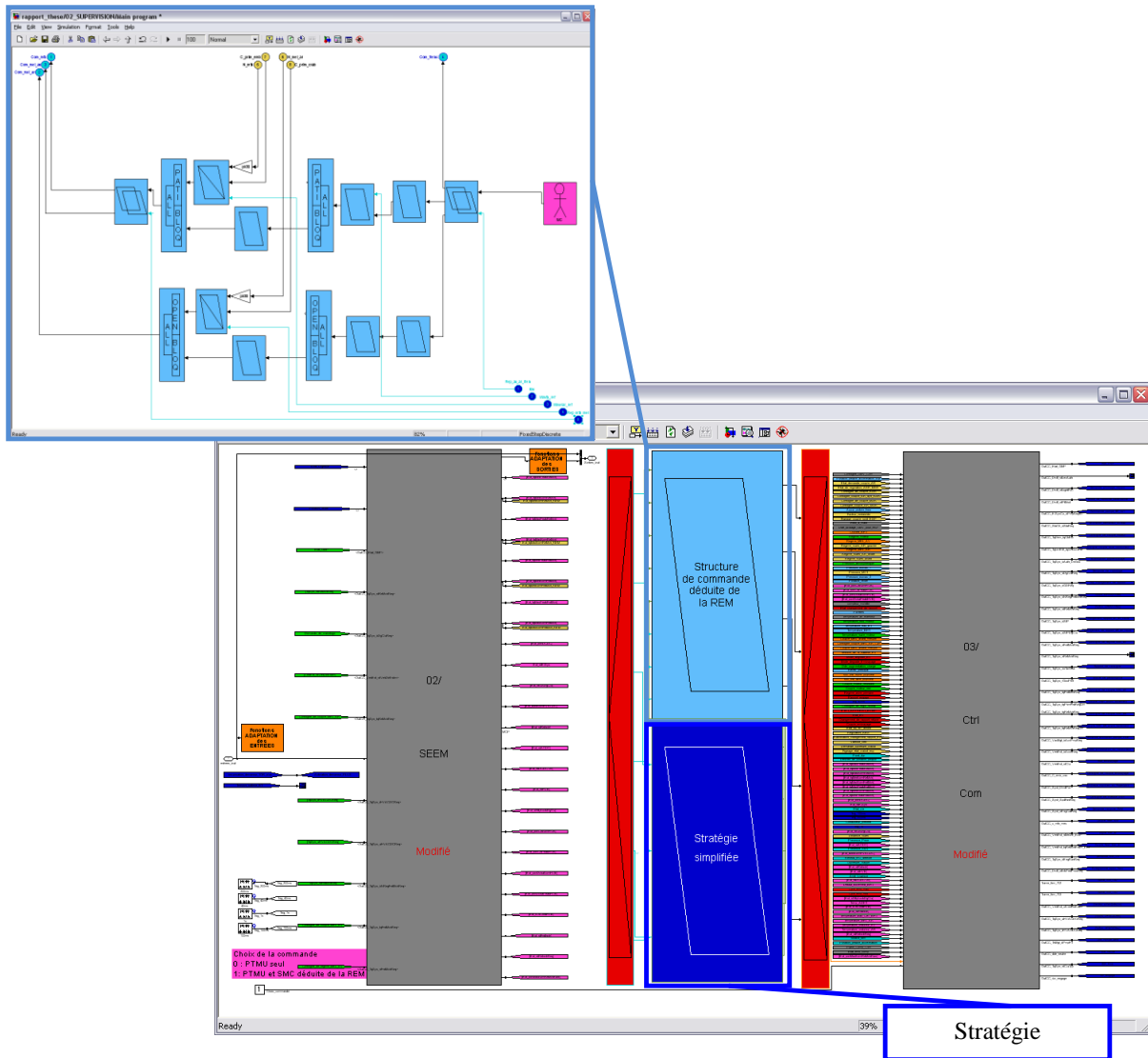


Figure 116 Implantation de la commande déduite de la REM sous MATLAB / Simulink

Résultats de simulation en boucle ouverte – L’objectif de cette simulation est de comparer les dynamiques et amplitudes des signaux envoyés aux différents organes du véhicule entre le programme original et le programme incluant la commande basée sur l’inversion de la REM. La simulation étant effectuée en boucle ouverte, la stratégie ne pourra en aucun cas être validée (Figure 117).

La stratégie de gestion de l’énergie est calée pour démarrer le moteur thermique au même moment que celui de ce cycle ($t = 65$ s). Une consigne de fermeture de l’embrayage est donc envoyée ($P_{emb} = 1$) et le moteur thermique fournit le couple nécessaire à la traction.

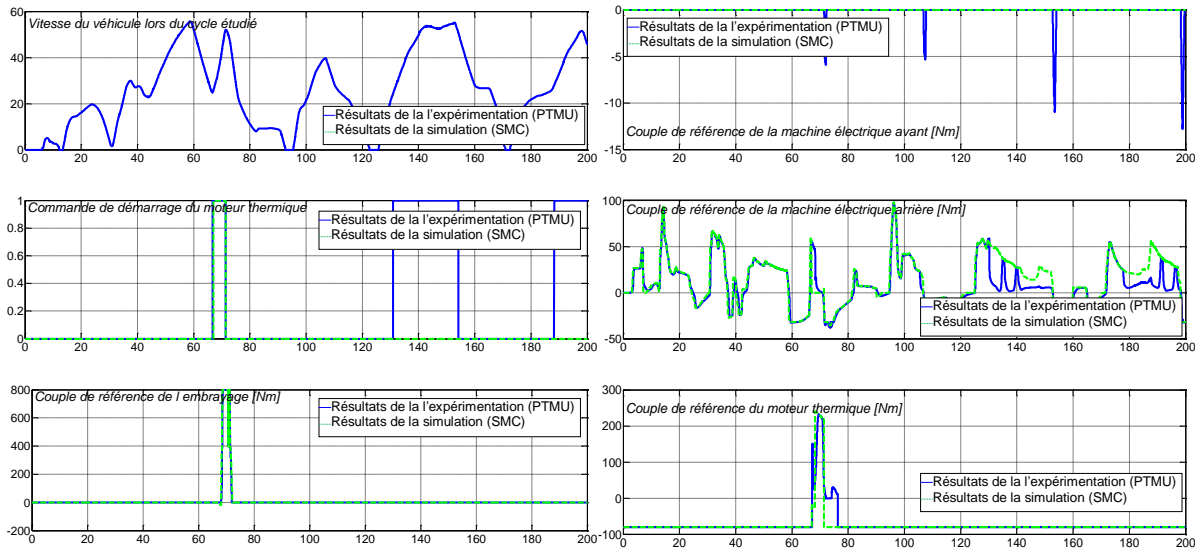


Figure 117 Résultat de la simulation du PTMU – SMC en boucle ouverte

Une différence notable entre la commande issue de la REM et le PTMU est la dynamique des signaux : en effet, le PTMU prend en charge en plus de la traction un aspect confort de conduite (Figure 118). De ce fait, le couple de la machine électrique arrière de référence est beaucoup plus lissé avec le PTMU qu’avec la commande issue de la REM. Une modification des correcteurs utilisés en REM aurait pu être réalisée pour s’apparenter au mieux aux résultats d’expérimentation.

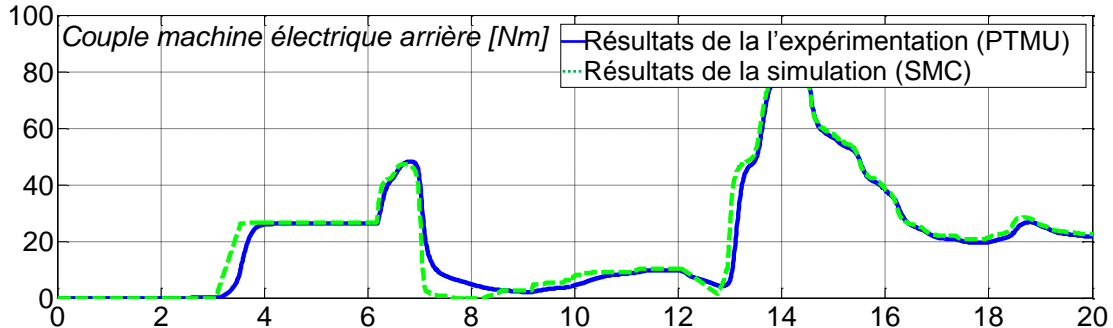


Figure 118 Zoom sur le couple de la machine électrique arrière

Après la réalisation de cette simulation, la commande des organes en boucle ouverte, dynamique et amplitude, a été validée. La prochaine étape consiste à implanter la commande élaborée dans le PTMU du véhicule prototype étudié.

IV.2.b. Résultats d’expérimentation

Zone de roulage - Les différents tests sur le prototype étudié sont effectués sur une piste d’essai située dans le centre technique de Carrière-Sous-Poissy. Cette piste, nommée ZRS (Zone de Roulage Sécurisée), permet grâce à ses dimensions (Figure 119) de faire des cycles à vitesse élevée (supérieure à 100 km/h).



Figure 119 Zone de roulage sécurisée

Interface homme machine - Une interface homme machine (Figure 120) a été mise en place pour pouvoir contrôler différents paramètres du système pendant le cycle, choisir entre la commande issue de l'inversion de la REM et la commande originale et de pouvoir modifier certains paramètres de la stratégie (SoC_{min}) en fonction de l'état de charge initial de la batterie.

The screenshot shows the HMI interface with several key components:

- Choix de la commande utilisé:** A section for selecting between 'PIMU + Commande bascule inf. Inversion de la REM' and 'PIMU Original'.
- Mode de fonctionnement:** A section for selecting between 'Mode recharge', 'Mode tout électrique', and 'Mode recharge à l'arrêt validé'.
- Paramètres de la stratégie utilisée:** A section for setting 'SOC Min - Recharge arrêt' to 25, 'Mode tout électrique' to 0, and 'Mode recharge à l'arrêt validé' to 0.
- Résultats d'expérimentation:** A grid of plots showing SOC, Cmelar_ref, Vveh_mes, Num_rap_br_ref, Cmelav_ref, Cemb_ref, Cmbh_ref, and Wveh_mes over time.
- Paramètres d'acquisition:** A section for setting 'PPC: val_high - Normalisée' to 0.8% and 'Longeur' to 2.
- Stateflow choisissant le mode de fonctionnement:** A Stateflow diagram showing the logic for selecting the active command model for the clutch.
- Stateflow définissant le modèle actif de la commande de l'embrayage:** A Stateflow diagram showing the logic for selecting the active command model for the clutch.

Figure 120 Interface Homme-Machine élaborée sur Control-Desk

Avant l'implantation, et donc le test, de la commande globale dans le calculateur, une expérimentation intermédiaire est réalisée. Cette expérimentation consiste à utiliser le véhicule en mode tout électrique. Cette étape permettra de valider le comportement de la commande sans la stratégie.

Résultats d'expérimentation : mode tout électrique – Cette première étape a été réalisée dans le but de valider le mode tout électrique. Pour cela, la stratégie a été bloquée dans le mode tout électrique. Les résultats de cette expérimentation (Figure 121) montrent que la machine électrique arrière fournit la totalité du couple. L'état de charge de la batterie haute tension diminue donc lors des accélérations et augmente lors des freinages régénératifs.

Remarque : la différence qui a été mise en avant concernant la prise en compte d'un aspect confort de conduite s'est fait ressentir lors de la comparaison entre le programme original et le programme utilisant la commande basée sur l'inversion de la REM. En effet, lors des accélérations et des freinages, les jeux entre les dents du réducteur arrière avaient un effet sur la conduite non négligeable. Un recalage des correcteurs serait nécessaire a posteriori.

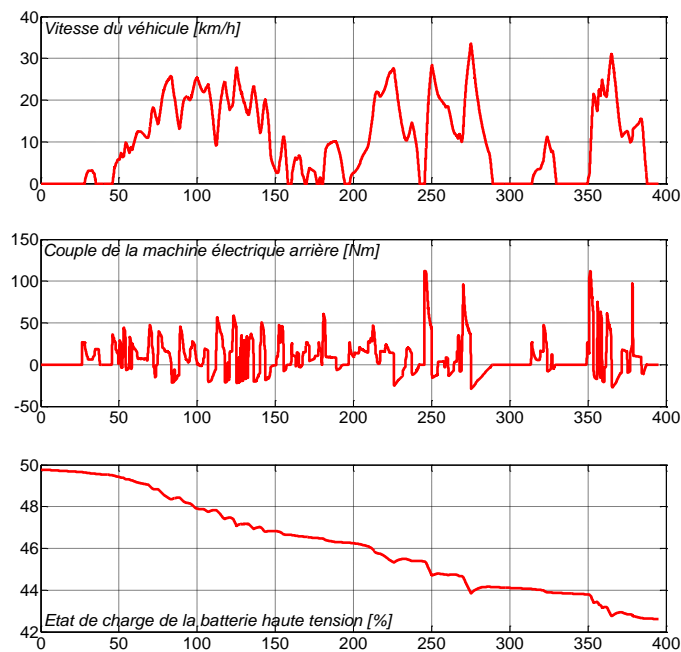


Figure 121 Résultats de l'expérimentation effectuée : mode électrique

Résultats d'expérimentation : mode hybride – Plusieurs expérimentations ont été réalisées : l'expérimentation choisie (Figure 122) permet de voir plusieurs modes de fonctionnement en étant dans une zone de vitesse de type urbain sur un seul tour de la ZRS.

La première phase d'accélération étant assez faible, la totalité du couple nécessaire est entièrement fournie par la machine électrique arrière (mode tout électrique). Suite à une accélération, l'embrayage se ferme ($P_{emb}=1$) et le moteur thermique prendra le relais et fournira la totalité du couple. Lors des phases de changement de rapport ($t = 15$ s), la machine électrique arrière va fournir un couple permettant d'éviter les ruptures de couple liées au

changement de rapport ($t=18$ s). Lors des phases de décélération, la machine électrique arrière récupère l'énergie du freinage. Lors du deuxième passage, la machine électrique avant va recharger la batterie lorsque la vitesse sera stabilisée.

L'état de charge de la batterie haute tension est très bas pour une utilisation en charge « sustaining ». L'objectif ici n'étant pas de valider la stratégie mais la portabilité sur prototype de la commande élaborée, cet état de charge initial n'a pas d'importance. Les différents modes de fonctionnement disponibles grâce à l'architecture de ce véhicule ont été testés. Cette expérimentation réalisée, l'importance de chaque étape effectuée lors de cette thèse sera discutée dans la section suivante.

La commande élaborée systématiquement par l'inversion de la REM dans le chapitre II a donc été utilisée sur le prototype sans modifications. Il s'agit de la même commande utilisée en simulation (chapitre II), puis en « simulation HIL » (chapitre III) avec la modification des paramètres et certaines fonctions déportées dans d'autres organes. On peut donc considérer que l'objectif initial, qui était de développer une commande applicable de la simulation jusqu'au prototype, a bien été réalisé.

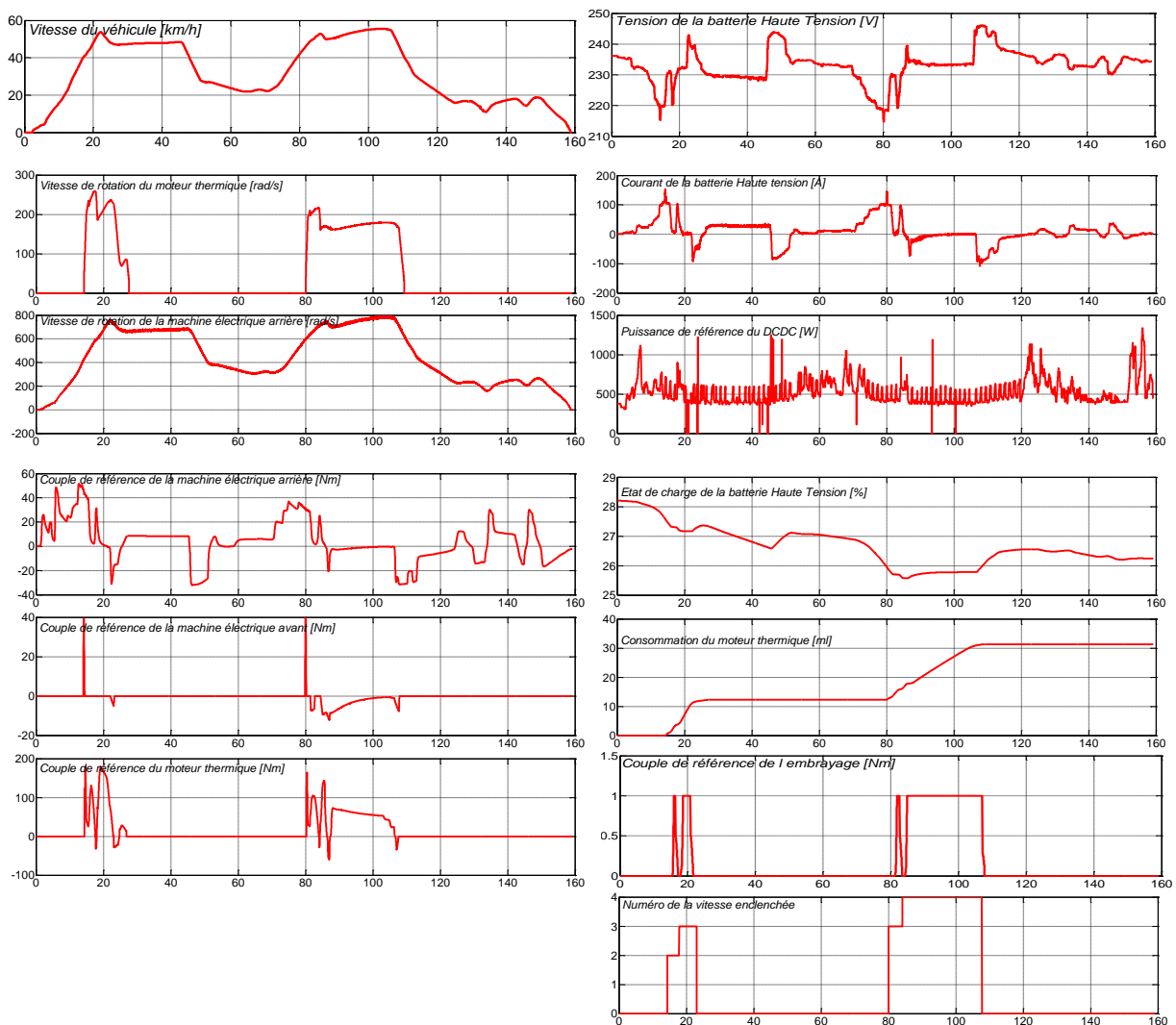


Figure 122 Résultats de l'expérimentation effectuée : mode hybride

IV.3. Intérêt des différentes étapes

Suite aux essais expérimentaux sur prototype, les simulations et les « simulations HIL » sont à nouveau effectuées avec les mêmes paramètres que ceux du véhicule prototype. La précision des simulations et des « simulations HIL » sera ainsi discutée. Dans la dernière partie, une réflexion est proposée sur l'importance de chaque étape entre la simulation et le prototype.

IV.3.a. Comparaison des résultats

Dans cette section, la commande implémentée sur le véhicule prototype (cf. IV.2.b.) sera répétée dans la simulation (cf. II.4.b.) et sur la « simulation HIL » (cf. III.3.b.). Les objectifs de cette section sont de comparer les résultats obtenus : consommation, dynamique, etc. et de discuter de l'intérêt de chaque étape.

Adaptation des simulations - Pour effectuer la simulation et la « simulation HIL », la première modification à réaliser est celle des modèles présents dans les simulations accomplies dans le véhicule de série par les modèles présents dans le véhicule prototype. Les éléments devant être modifiés ont été expliqués précédemment (Tableau 7). La stratégie utilisée sur le véhicule prototype n'est pas la même que celle utilisée en simulation et en « simulation HIL ». En effet, cette stratégie est directement basée sur celle élaborée par PSA Peugeot Citroën et implantée dans le PTMU original (Figure 123).

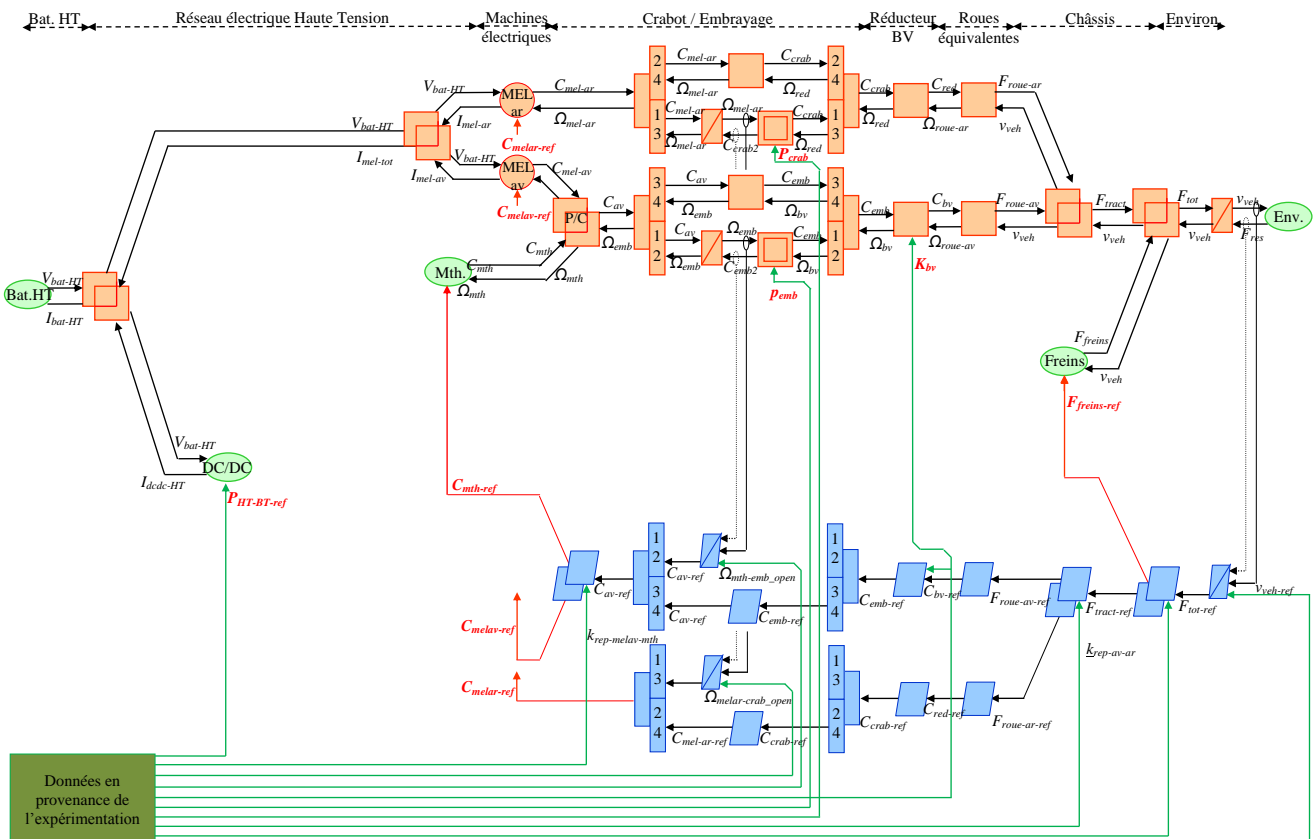


Figure 123 Mise en évidence des différentes entrées commandées par des données provenant de l'expérimentation

Pour pouvoir effectuer cette stratégie sans devoir utiliser tout le logiciel en simulation, des facteurs de répartitions sont recalculés par rapport aux données de l'expérimentation. La puissance transitée sur le convertisseur DC/DC, le numéro de rapport enclenché sur la boîte de vitesses, la consigne de fermeture ou d'ouverture de l'embrayage sont donc directement repris de l'expérimentation.

Résultats de la simulation – Suite aux modifications de la simulation en utilisant le logiciel de simulation du Département de la Recherche et de l'Innovation Automobile (DRIA) : SimVHP, couplé avec la structure de commande déduite de la REM, les résultats de la simulation sont disponibles Figure 124 et seront confrontés aux résultats obtenus lors de l'expérimentation.

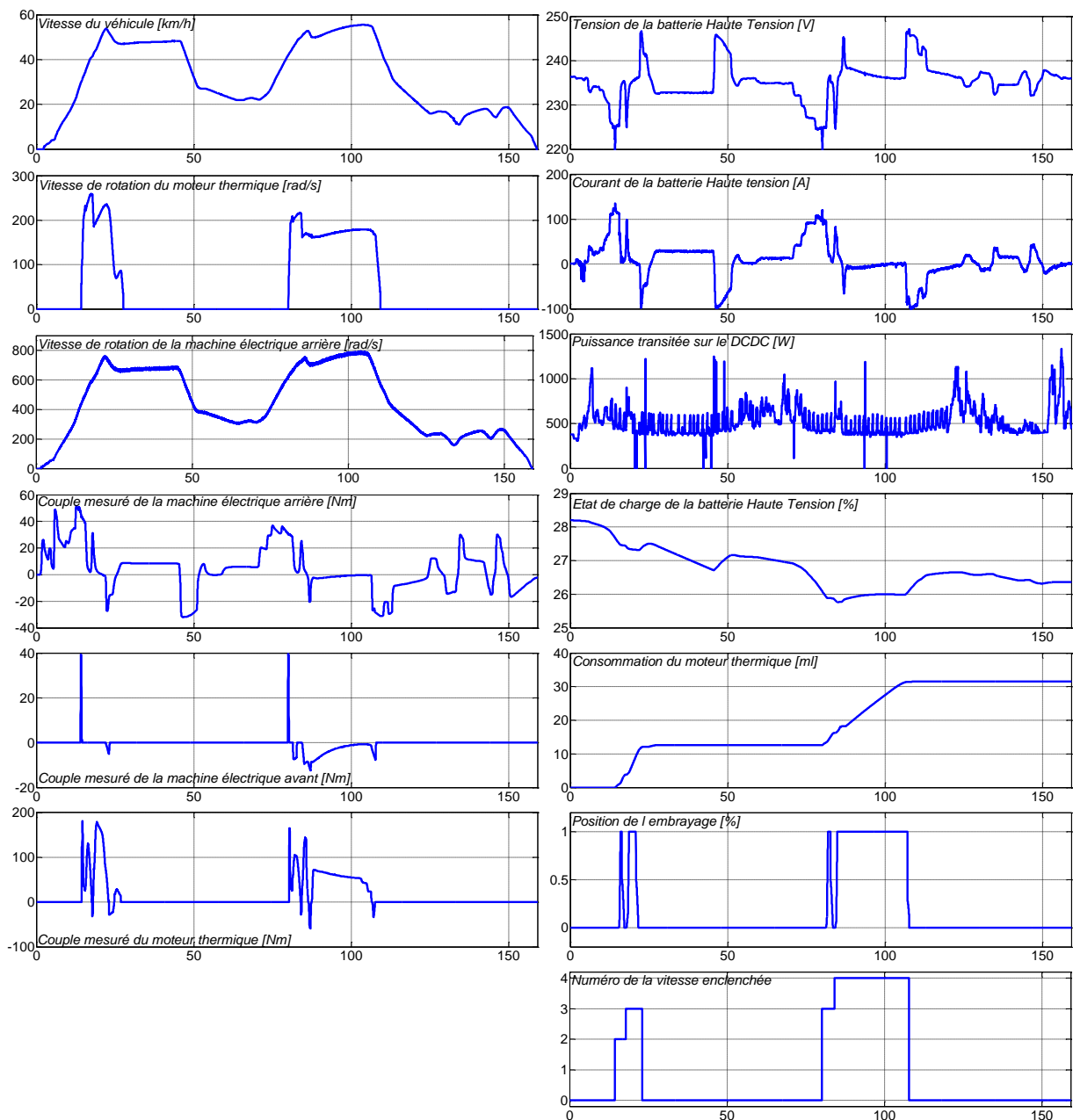


Figure 124 Résultats de la simulation de l'expérimentation réalisée sur le prototype

Résultats de la « simulation HIL » – Les modifications effectuées lors de la « simulation HIL » sont identiques à celles réalisées en simulation. Ces résultats sont disponibles Figure 125. La possibilité de pouvoir refaire la même expérimentation sur la plateforme d’émulation temps réel que celle effectuée sur le véhicule montre un intérêt de la « simulation HIL » : la répétabilité des expérimentations.

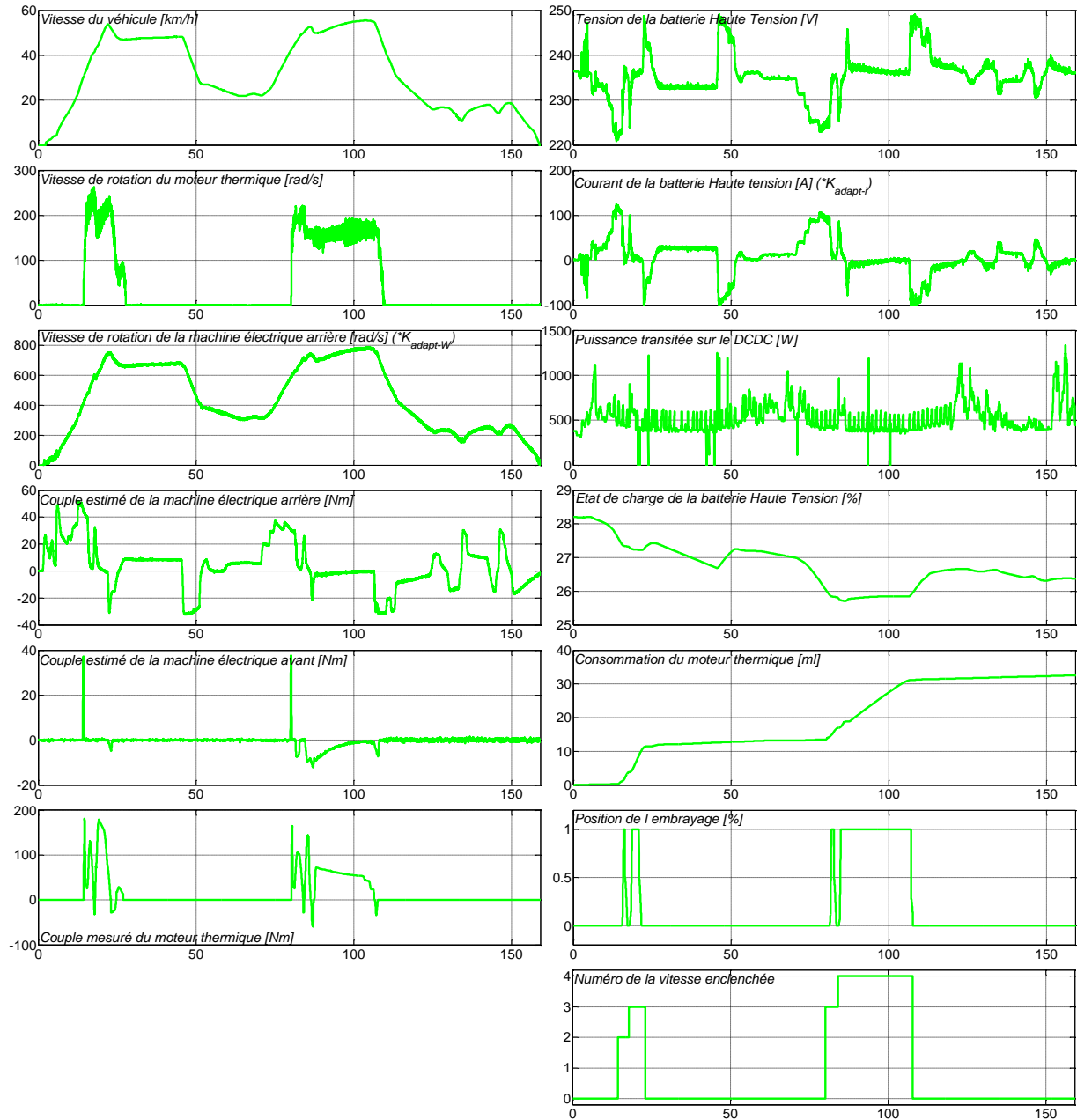


Figure 125 Résultats de la « simulation HIL » de l’expérimentation réalisée sur le prototype

Comparaison des résultats – Les résultats précédents montrent les différences lors des différents niveaux d’expérimentation. Différents résultats mécaniques sont donnés : couples et vitesses des machines électriques et du moteur thermique. Différents résultats sur la consommation sont montrés : consommation en électricité et de carburant.

Une « simulation HIL » est effectuée dans un environnement différent de celui du véhicule, plusieurs aspects ne seront pas identiques à l'environnement « véhicule » (ex : CEM, température, etc.). C'est pourquoi les résultats de la « simulation HIL » sont plus bruités. En effet, dans le véhicule toute la partie électronique de puissance est située dans le coffre du véhicule. Les perturbations dues à la commutation sur les mesures effectuées au niveau des machines sont donc amoindries. Sur la plateforme HIL, l'électronique de puissance est directement au contact des mesures (courants, tensions et surtout position). De plus, tous les couples de l'expérimentation sur prototype sont les couples de référence contrairement aux couples de la « simulation HIL » qui sont, quant à eux, des couples estimés (Figure 126). Mis à part le bruit dû aux explications précédentes, la simulation, la « simulation HIL » et l'expérimentation sur prototype offrent des résultats dynamiques très proches (couple, vitesse). Il faut cependant remarquer que sur la simulation, la modélisation des machines électriques étant effectuée de manière statique, le couple de référence est directement égal au couple effectué. Sur le prototype, un retard sur ce couple sera naturellement induit mais le PTMU n'a pas accès à l'information sur le couple réellement effectué par la machine électrique, l'estimation de la constante de temps de la machine est donc compliquée à réaliser. Sur la « simulation HIL » ayant accès à toutes les informations nécessaires, le couple réellement effectué par la machine est estimé, une constante de temps peut donc en être déduite (Figure 126).

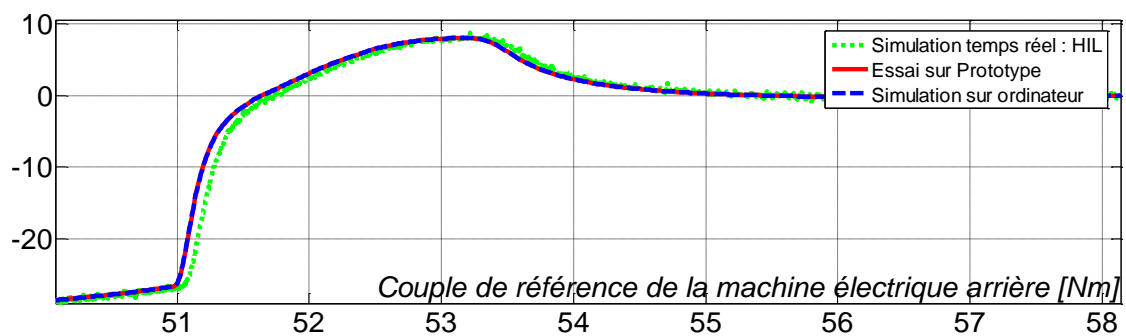


Figure 126 Résultats dynamiques de la commande en couple de la machine électrique arrière (zoom)

Un bruit de mesure conséquent est présent sur les courants (Figure 127) lors de la « simulation HIL ». Les courants provenant de l'expérimentation sur prototype sont les courants mesurés. Une certaine dynamique est remarquable sur ces courants par rapport aux courants de la simulation (Figure 127 a). Cette différence est due à la dynamique des machines qui n'a pu être montrée sur la figure précédente. Les courants de la « simulation HIL », qui eux, suivent la dynamique d'une machine électrique réelle, ont la même dynamique que celle du prototype et donc sont beaucoup plus proches de la réalité. La batterie haute tension étant modélisée de la même manière lors de la simulation et de la « simulation

HIL », leurs résultats en terme d'émulation de la tension de la batterie haute tension sont très proches (Figure 127 b). La seule différence provient de la dynamique discutée précédemment.

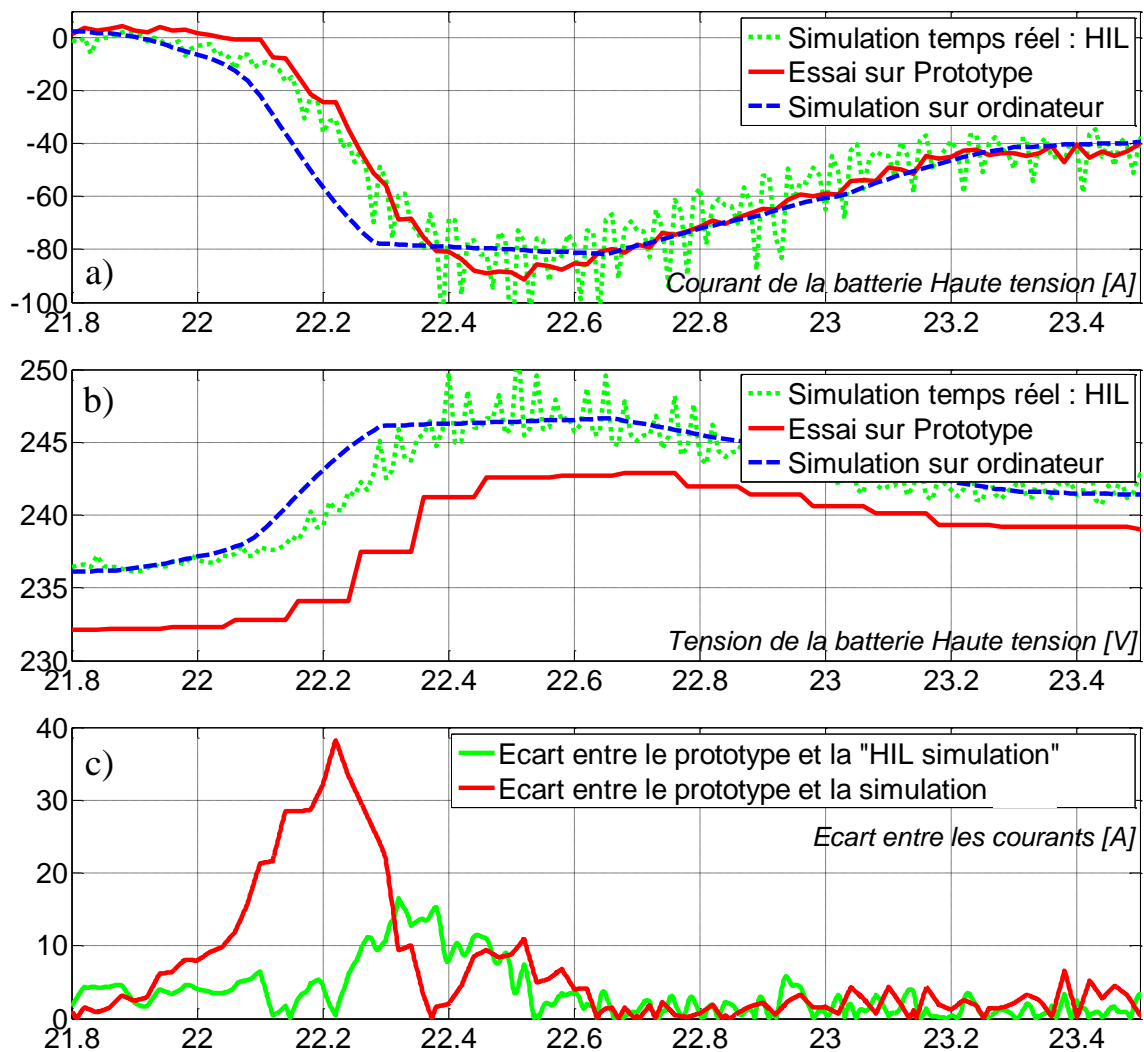


Figure 127 Résultats sur l'émulation de la batterie haute tension (zoom)

La dernière comparaison est effectuée sur les consommations en électricité et en carburant du véhicule (Figure 128). Le moteur thermique étant entièrement émulé lors de la « simulation HIL » et simulé lors de la simulation, il est normal que les deux courbes donnent des informations proches. Cependant, une différence est visible entre ces deux courbes et lors de l'expérimentation sur prototype. Cette différence est due à la précision des cartographies utilisées pour cette estimation de la consommation. Les bruits de mesure présents sur le courant (Figure 128) ont un impact négligeable sur l'état de charge de la batterie haute tension. En effet, malgré les bruits de mesure présents lors de la « simulation HIL », les courbes de l'état de charge de la simulation et de la « simulation HIL » sont très proches car ils utilisent les mêmes modèles.

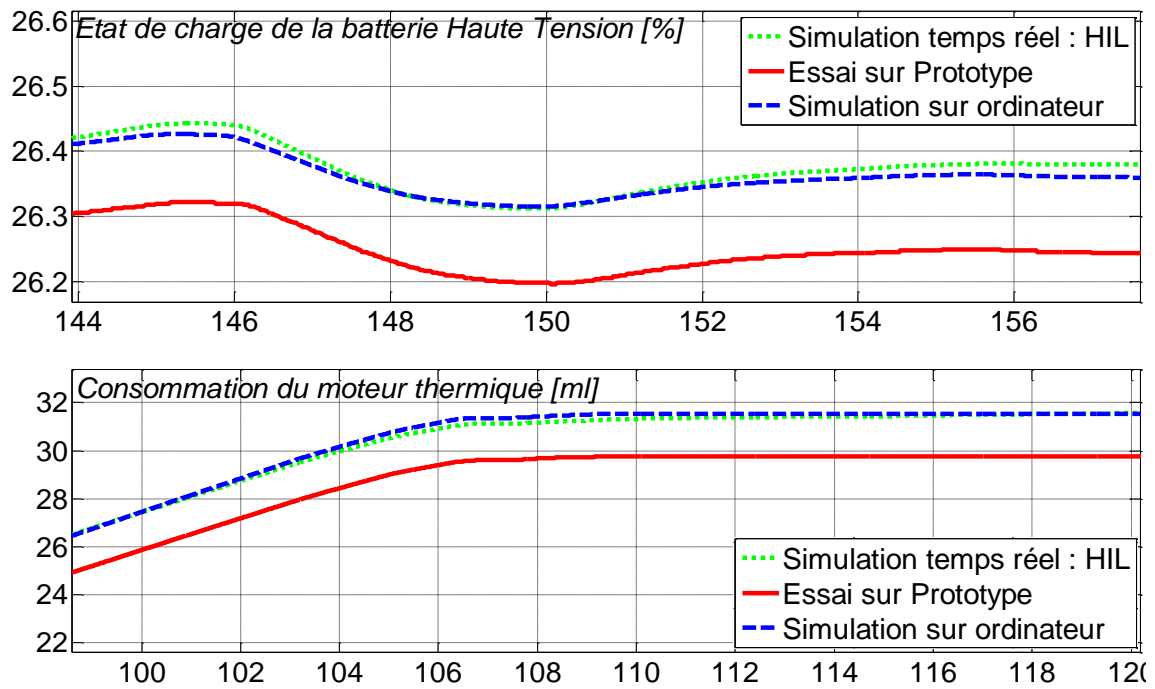


Figure 128 Résultats sur les consommations en électricité et en carburant du véhicule (zoom)

IV.3.b. Discussion sur les différentes étapes

Suite aux différentes remarques effectuées lors de cette thèse et lors des comparaisons des résultats précédents, il est important de définir le degré d'expérimentation nécessaire par rapport aux objectifs finaux. Les objectifs sont des variables importantes dans cette réflexion mais la complexité du système en est une autre à ne pas négliger. En effet, plus un système est complexe et innovant, plus l'incorporation d'étapes intermédiaires permettra de valider rapidement la commande réalisée et de diminuer au final le nombre de prototypes élaborés. Les étapes nécessaires pour répondre aux objectifs de l'étude et à la complexité du système étudié sont donc énoncées (Figure 129). Pour cela, plusieurs niveaux de complexité et plusieurs objectifs sont étudiés.

Du point de vue de la complexité, trois différents niveaux de complexité sont pris en compte :

- système simple : peu d'interaction avec l'environnement (ex : entraînement électrique),
- système complexe : intégration dans un système complexe et nécessitant la prise en compte de l'aspect sécurité / fiabilité (ex : véhicule électrique),
- système fortement complexe : fortes interactions entre les sous-systèmes (ex : véhicule hybride).

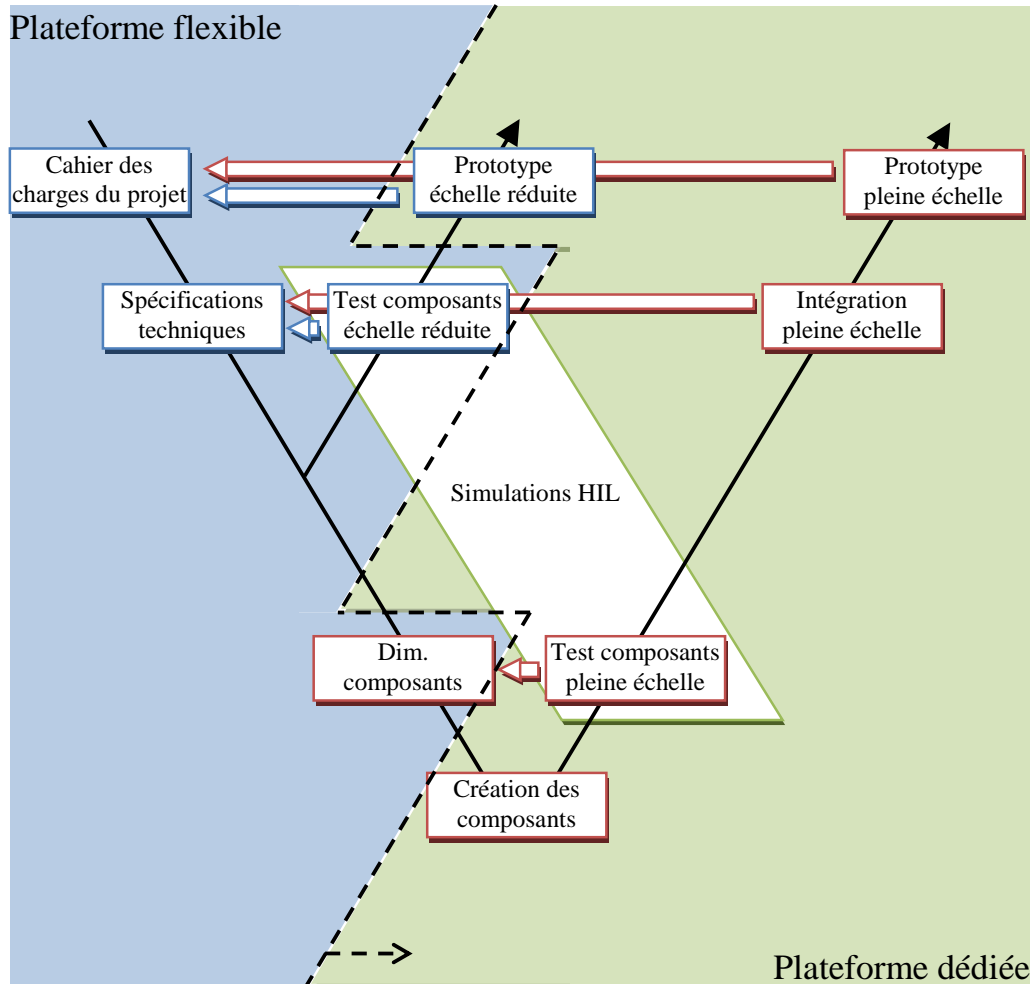


Figure 129 Résultats de la comparaison entre les différents niveaux de simulation

Les différentes étapes du cycle en V élaborée dans le Chapitre III sont étudiées. Ces étapes ne sont pas exhaustives et sont découpées en deux études. La première étude est effectuée sur une plateforme flexible qui offre la possibilité de représenter plusieurs applications. Cette étude est composée d'une étape de simulation et d'une « simulation HIL » à échelle réduite. Les principaux objectifs de cette étude sont :

- cahier des charges du projet : viabilité, tenant et aboutissant du projet,
- spécifications techniques : pré-dimensionnement, test de consommation. Ce deuxième objectif est de primo-valider la consommation et les différents gains potentiels du projet en fonction de ce qui est déjà existant en simulation,
- test des composants à échelle réduite : validation de la commande en temps réel. Le projet étant validé, la commande élaborée doit être testée en temps réel.

Dans le cycle en V étudié, l'ajout de l'étape prototype à échelle réduite rend l'application dédiée au système étudié. En effet, lors de la mise en place d'un prototype à échelle réduite certains éléments se doivent d'être identiques, à un degré d'échelle près, à ceux présents dans le véhicule final. La deuxième étude est effectuée sur une plateforme dédiée à l'application. Un temps de mise au point non négligeable et un coût en matériel sont

donc à prévoir dans ce type d'étude. Cette dernière est composée d'une étape de « simulation HIL » pleine échelle et d'expérimentation sur prototype pleine échelle. Les différents objectifs de cette étude sont :

- création des organes prototypes,
- test des composants : validation de la commande temps réel, utilisation des organes prototypes dans un environnement proche de celui de l'application (validation du dimensionnement),
- prototype pleine échelle : élaboration d'un prototype, test dans le véhicule réel. Un prototype pleine échelle peut être réalisé pour tester l'incorporation des composants dans un environnement confiné, où il est possible de tester les différents aspects du véhicule (CEM, température, etc.) en sécurité.

Discussion sur les différentes approches – Dans cette partie de discussion, les différentes approches de la simulation jusqu'au prototype seront comparées (Figure 130).

Approche industrielle - La première approche est l'approche utilisée dans le monde industriel (Approche actuelle Figure 130). Dans cette approche, après la simulation du véhicule étudié dans un logiciel de simulation à priorité structurelle, un test sur prototype statique est réalisé. Le passage direct de la simulation au prototype n'offre pas assez de validation intermédiaire pour valider la commande élaborée en temps réel. Liée à l'utilisation de logiciel de simulation à priorité structurelle, la mise en place de la simulation est très rapide. Cependant, l'impossibilité de fournir des pistes pour l'élaboration d'une commande respectant les règles de causalité est un inconvénient important. De ce fait, lors de l'incorporation de la commande sur véhicule prototype statique, il n'est pas rare que l'utilisateur se doive de revenir en simulation pour modifier la commande élaborée. L'étape prototype statique est importante, car elle permet, à partir d'un véhicule de série, d'apporter les modifications physiques : intégration des organes composant l'architecture étudiée, dans un environnement sécurisé. La validation de la commande dans ce cadre est importante. En effet, à cause de l'implantation sur véhicule réel, différents phénomènes physiques sont naturellement pris en compte (ex : CEM, bruits de mesure, etc.). La robustesse de la commande pourra donc être testée avant la mise en place d'un prototype dynamique. La mise en place du prototype dynamique offre la possibilité de tester le véhicule dans un environnement disposant de conditions climatiques aléatoires où la sécurité est à placer au premier plan. Dans le cadre de cette approche, seule la simulation est considérée comme une étape flexible, les autres étapes étant strictement dédiées à l'application étudiée. De ce fait, beaucoup de prototypes sont élaborés lors de chaque étude.

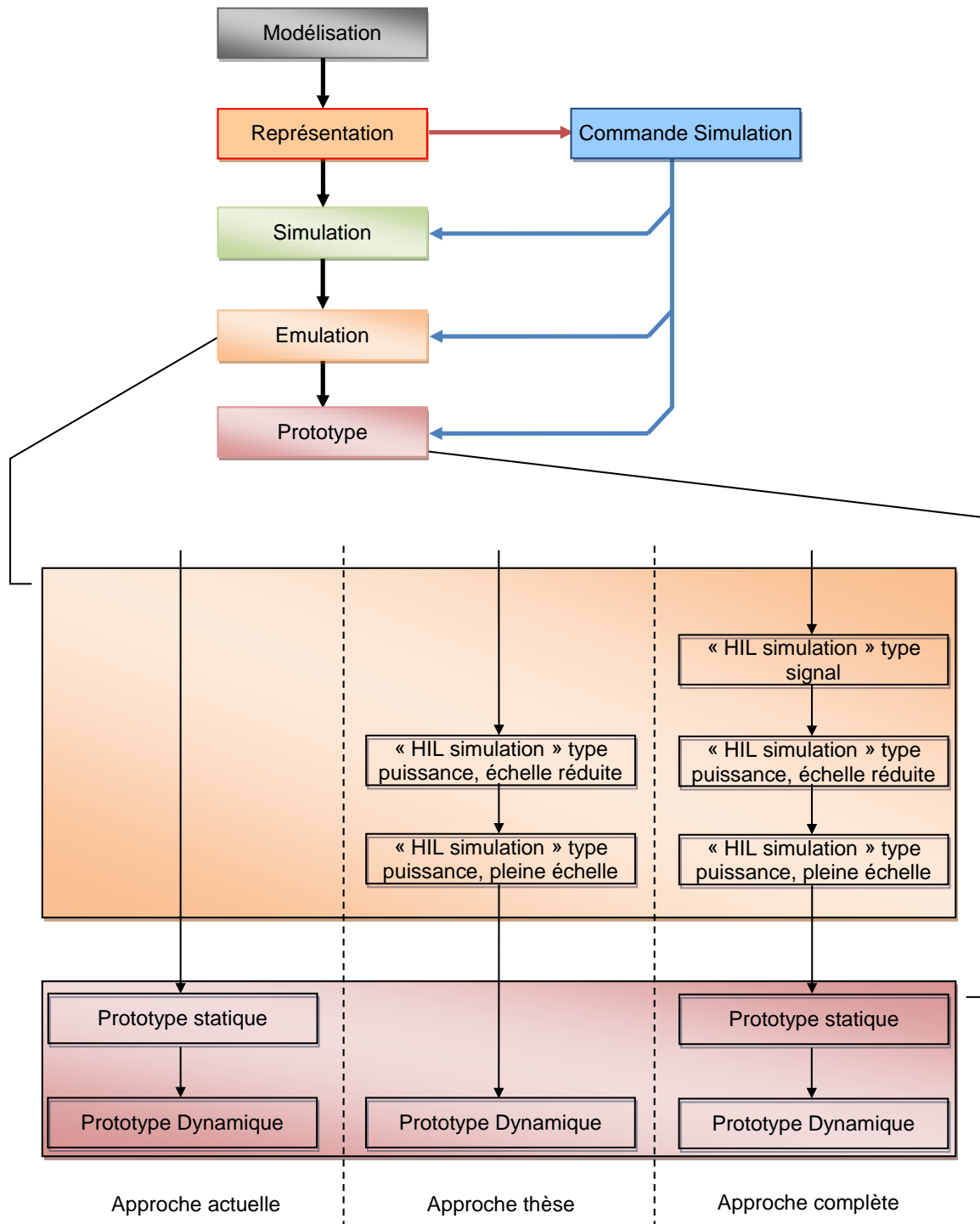


Figure 130 Différentes approches de la simulation au prototype

Approche thèse - L'approche effectuée dans le cadre de cette thèse utilise une représentation fonctionnelle. Cette représentation a permis de définir une structure de commande systématique et est directement implantable en simulation dans un logiciel de simulation à priorité fonctionnelle. Cette approche ajoute, par rapport à l'approche industrielle, une étape d'émulation temps réel. Deux émulations temps réel ont été réalisées : une « simulation HIL » de type puissance à échelle réduite, une « Simulation HIL » de type puissance pleine échelle. La « simulation HIL » de type puissance à échelle réduite a permis de valider la portabilité en temps réel de la commande élaborée en simulation. De plus, ce type d'émulation, utilisant des

organes réels, rend possible l'affranchissement des hypothèses de modélisation. En effet, au vu des résultats présentés (Figure 128), l'utilisation de modèles pour la batterie électrique haute tension n'offre pas une précision assez grande par rapport à l'organe réel. Il aurait donc été intéressant d'utiliser l'organe réel lors des émulations. Enfin, une « simulation HIL » à échelle réduite a grandement facilité le développement de la commande sur la pleine échelle. La « simulation HIL » de type puissance pleine échelle a permis de tester le comportement du composant réel dans un environnement proche de celui du véhicule. L'utilisation d'une « simulation HIL » à échelle réduite dans le cadre de cette thèse est apparue comme obligatoire. En effet, une plateforme permettant l'émulation étant déjà disponible dans le laboratoire, la mise en place de l'émulation temps réel du véhicule étudié sur cette plateforme offrait la possibilité de tester rapidement la commande et la structuration du programme de simulation sur une plateforme connue où tous les organes étaient déjà commandés. La mise en place d'une « simulation HIL » pleine échelle a pris, quant à elle, plus de temps. En effet, le temps de réception du matériel, de commande des organes et de modification de la plateforme « eV » liée à l'augmentation en puissance du banc ne sont pas à négliger dans la mise en place d'une nouvelle plateforme d'émulation temps réel. Une étape de prototype statique aurait pu être préconisée pour les mêmes raisons que celles énoncées dans l'approche industrielle. Cependant, le prototype étant déjà présent et les organes ayant déjà été validés dans le véhicule cette étape n'est pas apparue comme importante. L'étape de prototype dynamique a permis de valider la portabilité de la commande systématique utilisée depuis la simulation dans un véhicule prototype. Dans le cadre de cette approche, la simulation et la « simulation HIL » de type puissance à échelle réduite sont des étapes flexibles : aucun surcoût financier n'est à prévoir pour effectuer ces étapes si le matériel nécessaire est déjà disponible.

Approche complète - La dernière approche est une approche complète. Cette approche n'est pas celle la plus recommandable en gain de temps mais, multipliant les étapes, elle permet de tester différents aspects de la commande à chaque étape. L'ajout principal dans cette approche est une étape « simulation HIL » de type signal. Cette étape permet, à un coût matériel nul si une plateforme est déjà présente, de tester la portabilité en temps réel de la commande développée ainsi que de s'assurer de la communication entre le calculateur étudié et un réseau (ex : CAN) émulé.

D'autres combinaisons peuvent s'en déduire (exemple : « simulation HIL » de type signal puis prototype) en fonction des objectifs, coût et priorité de l'étude.

Intérêt de la REM dans ces approches - Dans le cadre de l'élaboration de la commande d'un nouveau véhicule, la REM a été bénéfique sur plusieurs points. Tout d'abord, la REM, disposant de règles d'inversion systématique, permet de définir une structure de commande

systematique. Cette thèse a prouvé que cette commande était implantable en simulation, dans un logiciel de simulation à priorité fonctionnelle et dans un logiciel de simulation à priorité structurelle, lors d'émulations temps réel et enfin sur le véhicule prototype. Cet outil a donc permis d'unifier les commandes à chaque étape. Lors des « simulations HIL », la REM a permis de structurer la démarche en facilitant la compréhension des éléments qui étaient émulsés. Elle a en particulier servi de base pour les modèles à simuler en temps réel : la causalité intégrale est un facteur favorisant la réalisation d'une simulation en temps minimal. Lors de ces émulations temps réel, la REM a permis de mettre en avant les différentes interfaces entre les parties physiques et les parties émulsées.

IV.1. Conclusion

Après avoir simulé le véhicule, effectué divers « simulations HIL », l'expérimentation sur véhicule a été réalisée. Elle a permis de valider la portabilité directe sur le prototype de la commande systématique basée sur l'inversion de la REM. En effet, depuis la simulation la même commande a été utilisée. L'utilisation d'une démarche de l'élaboration de la commande à partir d'une représentation fonctionnelle, permettant de définir une structure de commande systématique a donc prouvée son intérêt et son bon fonctionnement.

Après avoir effectué une expérimentation sur le véhicule prototype de PSA Peugeot Citroën, cette même expérimentation a été effectuée en simulation et en « simulation HIL » pleine échelle. Ce travail a permis de pouvoir tester les différentes étapes dans le même cadre et de trouver des résultats très proches: la plateforme HIL est donc bien représentative du comportement du prototype et pourra permettre de tester différentes stratégies et organes. Cependant, le modèle de la batterie effectué de manière quasi-statique ne semble pas assez précis. En effet, une divergence est visible après quelques minutes d'utilisation entre les résultats lorsque la batterie est remplacée par un modèle (simulation et « simulation HIL ») et de l'expérimentation. Dans ce cas, il pourrait être intéressant de faire une « simulation HIL » de type puissance et d'utiliser la batterie réelle et pas seulement un modèle. L'avantage de la « simulation HIL » est, en tant que plateforme ouverte, de pouvoir ajouter facilement d'autres mesures. Ce qui n'est pas le cas dans le véhicule. La configuration de la plateforme expérimentale a une grande importance. En effet, lors d'expérimentation plusieurs aspects négligés en simulation (ex: CEM, discrétisation, etc.) impacteront sur la commande. Même si la topologie du matériel en « simulation HIL » n'est pas la même que dans le véhicule, l'étude de ces phénomènes avant l'implantation sur véhicule ne peut avoir que des avantages : test de la robustesse de la commande entre autre.

Dans la dernière discussion, les différentes approches, actuelle, effectuée dans cette thèse de doctorat et complète ont été comparées. L'absence d'étape intermédiaire jusqu'à l'implémentation sur prototype n'offre pas assez de validation partielle dans le cadre d'une structuration de la démarche de l'élaboration de la commande de nouveaux véhicules. Dans cette thèse une étape d'émulation temps réel a été ajoutée et a été réalisée sur une plateforme à échelle réduite qui a permis de valider la portabilité en temps réel de la commande et sur une plateforme pleine échelle qui a permis de valider la robustesse de la commande et le comportement des organes dans un environnement proche de celui du véhicule. Enfin, l'approche complète ajoute une étape « simulation HIL » de type signal. Cette étape permet de valider la commande en temps réel avec un coût financier et temporel moindre. L'ajout de ces étapes permettra aussi, au final, de diminuer le nombre de prototypes élaborés dans la phase de développement.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse de doctorat était de proposer une démarche permettant d'optimiser le temps de conception de la commande d'un nouveau véhicule. Pour cela, une structure de commande systématique basée sur l'inversion d'une représentation a été utilisée : la Représentation Energétique Macroscopique.

Le chapitre I a montré l'importance de modifier notre façon de penser le transport. Dans le but de diminuer notre impact sur l'environnement et notre dépendance énergétique, il est important de diminuer notre consommation en hydrocarbures. L'utilisation de véhicules moins énergivores tels que les véhicules électriques hybrides est un compromis entre consommation, autonomie et temps de recharge. Ils permettent par ailleurs d'éviter une rupture technologique. PSA Peugeot Citroën se lance sur le marché très convoité des véhicules hybrides en lançant le premier véhicule hybride diesel : 3008 HYbrid4. Ce véhicule dispose d'une motorisation conventionnelle associée à deux machines électriques. La complexification de la chaîne de traction de ce véhicule, par rapport aux véhicules standards, rend l'élaboration de la commande d'un tel véhicule plus compliquée. La démarche utilisée aujourd'hui dans le domaine industriel est heuristique. Il est donc important de définir une nouvelle démarche pour l'élaboration de la commande des nouveaux véhicules. De nouvelles étapes sont proposées pour systématiser et valider la commande.

La première étape, discutée dans le chapitre II, consiste dans l'utilisation d'une représentation fonctionnelle (REM) qui définit une structure de commande systématique basée sur l'inversion de la représentation. Après avoir élaboré la structure de commande à partir de la REM, le couplage avec l'outil de simulation utilisé par PSA Peugeot Citroën : SimVHP, a été réalisé. Cette « simulation mixte » couple les avantages de la simulation structurelle (représentation rapide du système étudié), et ceux de la simulation fonctionnelle (définition d'une structure de commande systématique). Cette simulation a été réalisée sous le logiciel MATLAB avec son interface graphique Simulink et a permis de prouver le bon fonctionnement de la commande systématique sur une représentation structurelle dans un environnement de simulation à priorité fonctionnelle. Une systématisation de la structure de commande en simulation est donc réalisable.

Dans le chapitre III, une deuxième étape a été proposée. Le passage direct sur prototype après l'étape de simulation est trop rapide pour garantir pleinement la fiabilité d'une commande en temps réel. De ce fait, l'utilisation d'une étape intermédiaire permet une validation progressive. L'incorporation de « simulations HIL » permet de tester le

comportement de la commande, élaborée en simulation, en temps réel. Ces « simulations HIL » de type puissance ont permis, outre de valider la portabilité en temps réel de la commande, de valider la commande des machines électriques de traction. La première émulation temps réel réalisée était à échelle réduite. La mise en place de l'émulation sur une plateforme complètement connue et flexible a été rapide. Cette émulation a permis de valider la portabilité temps réel de la commande réalisée et de structurer l'émulation avant l'utilisation d'une plateforme dédiée avec un coût en temps et financier relativement faible. La deuxième émulation (« simulation HIL » pleine échelle), a permis de valider le comportement des organes dans un environnement électrique et mécanique proche de celui du véhicule. L'utilisation d'une plateforme dédiée a pris du temps (modification des installations et adaptation à la montée en puissance) et a nécessité un investissement financier non négligeable. La REM a été, dans ces différentes étapes, une grande aide dans la structure globale : partie émulée, partie physique et système d'interface.

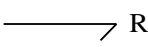
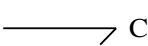
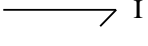
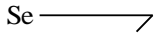
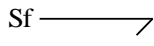
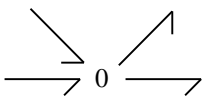
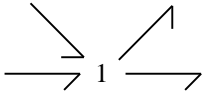
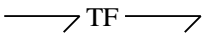

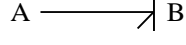
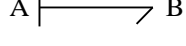
La dernière étape dans l'élaboration de la commande d'un véhicule a fait l'objet du chapitre IV. Cette étape consiste en l'implémentation de la commande déduite par inversion du chapitre II dans une voiture prototype. Certaines modifications ont été effectuées lors du passage entre la « simulation HIL » et le prototype. Cependant, ces modifications n'ont pas modifié la structure de la commande développée précédemment. La même commande que celle utilisée en simulation a donc bien été directement transposable sur le prototype. Après avoir répété l'expérimentation réalisée sur le prototype de PSA Peugeot Citroën en simulation et en « simulation HIL », plusieurs conclusions ont été déduites. La première concerne les organes complexes à modéliser (ex : batterie haute tension). Il a été remarqué que les modèles utilisées en simulation et dans les « simulations HIL » ne paraissaient pas assez précis par rapport au prototype. Pour résoudre ce problème, en simulation, il faudrait complexifier le modèle et donc utiliser plus de temps de calcul. En « simulation HIL », l'incorporation de la batterie réelle dans la boucle de simulation aurait été une solution pertinente. L'intérêt des différentes étapes a été discuté. Il dépend de plusieurs facteurs : complexité de l'étude, objectifs de l'étude et disponibilité du matériel. Si, par exemple, une plateforme de « simulation HIL » flexible (échelle réduite) existe, l'utiliser fera gagner du temps, permettra de tester plusieurs aspects de la commande et d'organiser la simulation temps réel à un coût réduit.

Lors de ce doctorat, la REM a été l'élément fédérateur de la démarche. Tout d'abord, elle a permis de réaliser une structure de commande systématique basée sur l'inversion de la représentation. Il a été prouvé, dans cette thèse et lors de précédents travaux, que cette structure de commande était directement implantable en temps réel. De plus, n'utilisant que la

causalité physique (intégrale), la simulation de certains sous-systèmes est directement utilisable en temps réel. De ce fait, il est facile de mettre la commande et l'émulation d'une partie du système dans un environnement de simulation temps réel. La REM a aussi permis une unification de la commande lors des différentes étapes. Pour la première fois, la REM a été implémentée dans la structure de commande de la traction d'une automobile hybride industrielle. La même commande a été utilisée de la simulation jusqu'au prototype, et ce, malgré la complexité de la chaîne de traction du véhicule étudié.

Les perspectives de ce travail sont multiples. Dans le test des différentes étapes de l'élaboration de la commande d'un nouveau véhicule, une étape de la démarche complète énoncée dans le chapitre IV n'a pas été effectuée : la « simulation HIL » de type signal. Cette étape permettrait de valider la portabilité de la commande en temps réel mais aussi la vitesse du calculateur dans le cas où celui-ci serait le même que celui du véhicule. L'étape de simulation est d'un grand intérêt, elle permet de valider plusieurs aspects de la commande et du véhicule. Cependant, tous les phénomènes physiques ne sont pas représentés. La complexification du modèle de certains organes « critiques » permettrait d'augmenter la plage de validité des modèles. Ce qui pourrait avoir comme effet de pouvoir se passer d'une « simulation HIL » permettant d'effectuer le test de ces organes. Lors de l'émulation temps réel pleine échelle, les machines électriques étaient de même puissance mais ne fonctionnaient pas à la même vitesse. Il serait intéressant lors de futurs travaux de tester, sur un banc dédié, les machines du prototype. Il a été mis en avant dans le chapitre III que la modélisation de la batterie reste assez compliquée. L'incorporation de la batterie réelle dans l'émulation temps réel est une amélioration intéressante. Une plateforme d'émulation temps réel étant maintenant présente, le test de nouveaux composants (batteries, convertisseurs, etc.) dans un environnement proche de celui du véhicule est désormais possible. Lors de l'incorporation de la structure de commande effectuée dans le chapitre II dans le programme du calculateur, il a été remarqué que tous les modes (mode hors roulage, mode recharge à l'arrêt, etc.) n'étaient pas pris en compte. La commande de tous ces modes en utilisant la même méthodologie est une perspective de ce travail. La gestion du frein mécanique n'est pas directement effectuée par le PTMU mais par l'ESP qui agit comme un superviseur. La structure de commande effectuée dans ce doctorat n'a donc pas agi sur les freins mécaniques. L'action de la REM sur le calculateur ESP est une perspective de ce travail de doctorat. Finalement, l'étude de diverses stratégies de gestion de l'énergie, en temps réel, pourrait être effectuée sur la plateforme HIL. Cela serait d'autant plus intéressant que l'on sait que les stratégies « optimales » demandent souvent un temps de calcul incompatible avec le temps réel. Leurs simplifications et validations sur une telle plateforme seraient judicieuses.

Annexe A : Eléments constitutifs du BondGraph

Bond Graph			
Le Bond Graph est un langage de transferts de puissance au sein d'un système. La causalité intégrale n'est que préférentielle.			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Éléments passifs	 R	relation entre effort et flux (dissipation d'énergie)	amortisseur, frottement, résistance électrique, restriction hydraulique
	 C	relation entre effort et déplacement (stockage d'énergie potentielle)	ressort, élasticité, réservoir, condensateur
	 I	relation entre flux et moment (stockage d'énergie cinétique)	masse, inertie, bobine
Éléments actifs	Se 	e indépendant de f (source d'effort)	pesanteur, générateur de tension
	Sf 	f indépendant de e (source de flux)	pompe, générateur de courant
Éléments de jonction	 0	$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum a_i f_i = 0$	couplage série en mécanique, parallèle en électrique et hydraulique
	 1	$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum a_i e_i = 0$	couplage parallèle en mécanique, série en électrique et hydraulique
	TransFormateur (TF) 	transformation de l'énergie	levier, poulies, engrenages, transformateur électrique, couplage système physiques
	GYrateur (GY) 	conversion/transformation de l'énergie	moteur à courant continu, capteur à effet Hall, couplage systèmes physiques
Causalité	A  B	A impose l'effort à B	
	A  B	A impose le flux à B	

Annexe B : Modélisation utilisée dans SimVHP

Confidentialité PSA Peugeot Citroën

Annexe C : Initiation à la Représentation Énergétique Macroscopique

Principe de la REM

- Un aspect graphique (de type Bond Graph, Graphe Informationnel Causal, Système Multi Machine ...) permettant une grande lisibilité même dans les systèmes complexes.
- Une grande concision (de type Système Multi Machine). En effet, la notation vectorielle permet de faire une grande avancée dans la lisibilité des systèmes complexes.
- Le principe d'action/réaction (de type Système Multi Machine, Bond Graph) permet de mettre en exergue la notion de puissance instantanée (ou énergie)
- La causalité intégrale (de type Graphe Informationnel Causal) est un grand atout en vue de l'inversion du système étudié pour l'établissement de la commande

Différents éléments constituant la REM

Les sources

Descriptif :

Définition : Les sources sont les éléments terminaux de la représentation énergétique macroscopique. Elles peuvent être soit génératrices ou réceptrices d'énergie.

Entrée / Sortie : Elles disposent d'une entrée et d'une sortie

Pictogramme : Ovale vert clair contour vert foncé

Exemples :

Les sources mécaniques - Cet exemple (Figure 131) représente la force de résistance au roulement fourni par une roue. Cet élément se trouvera principalement dans le domaine du transport, comme dans le cas présent, et il se situera en fin de chaîne.

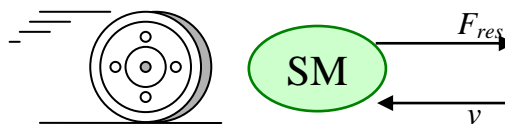


Figure 131 Source mécanique une roue

Les sources électriques - Dans cet exemple (Figure 132), un système de tension triphasé est représenté. Cet exemple permet de mettre en exergue un avantage de la REM qui est la possibilité d'utiliser des vecteurs : ce qui permet une meilleure lisibilité. Seulement deux variables sur trois sont représentés car la troisième est la somme des deux autres.

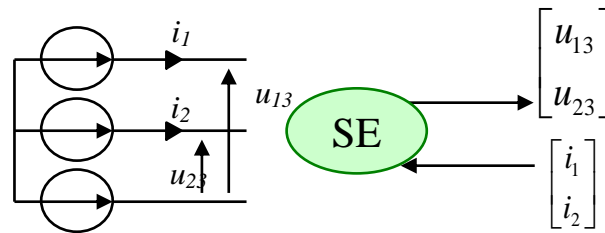


Figure 132 Source électrique : un réseau triphasé

Les éléments d'accumulation

Descriptif :

Définition : Ces éléments sont la distinction entre la représentation REM et la représentation S.M.M. (Système Multi-Machine). Lorsqu'ils sont présents ils indiquent une rupture temporelle et une accumulation d'énergie en interne. Ce qui respecte donc le principe de causalité physique : la sortie est une fonction intégrale de l'entrée.

Entrée / Sortie : ils disposent de 2 entrées et de 2 sorties

Pictogramme : rectangle barré orange contour rouge

Exemples :

Les éléments d'accumulation d'énergie potentielle - Les éléments d'accumulation peuvent être de type électrique ou mécanique. La construction d'un élément d'accumulation se fait de la façon suivante : tout d'abord, repérer la variable d'état. Une variable d'état est une variable qui ne peut subir de discontinuité. Dans le cas d'un ressort le couple est la variable d'état. Ensuite, cette variable est obligatoirement une sortie de cet élément en vu de ses propriétés. Le condensateur et la raideur d'un arbre accumule de l'énergie potentielle.

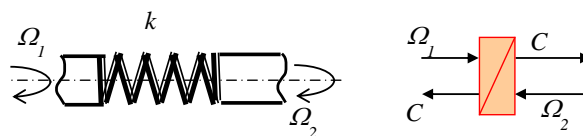


Figure 133 Elément d'accumulation : la raideur d'un arbre

Les éléments d'accumulation d'énergie cinétique – Comme énoncé précédemment : une des propriétés principales des variables d'état est qu'elles ne peuvent pas subir de discontinuité. De ce fait, il est facilement compréhensible que si l'on prend l'exemple de la Figure 134, l'arbre ne peut pas subir de discontinuité de vitesse. Sinon l'arbre casserait. L'inductance accumule de l'énergie cinétique sous la forme d'un courant tandis que l'inertie d'un arbre accumule de l'énergie sous la forme d'une vitesse.

$$L \frac{di}{dt} = V_1 - V_2 \quad (34)$$

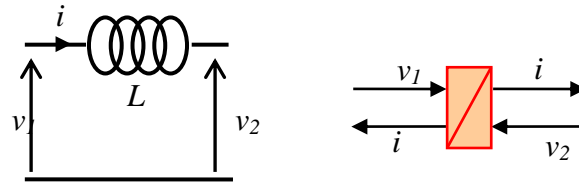


Figure 134 Elément d'accumulation : l'inductance

Les éléments de conversion sans accumulation d'énergie

Descriptif :

Définition : Ces éléments, déjà présents dans la modélisation de type Système Multi Machines (S.M.M.), sont un grand intérêt dans la REM. En effet, ils permettent de faire une conversion d'énergie sans accumulation.

Entrée / Sortie : ils disposent de 2 entrées et de 2 sorties et d'une variable de réglage (éventuelle)

Pictogramme : un carré correspond à un convertisseur mono-physique, et un rond correspond à un convertisseur multi-physique, par exemple : électromécanique. Intérieur orange contour rouge.

Exemples :

Les convertisseurs électriques -Le premier type de convertisseur est électrique. Il permet de convertir un signal électrique en un autre signal électrique. Cette transformation peut être de type amplitude, phase, etc. Dans cet exemple, nous appliquons une transformation de type amplitude : en effet, la tension de sortie sera égale à un rapport de modulation multiplié par la tension de batterie (35).

$$\begin{cases} u = mV_{DC} \\ i_{bat} = mi_s \end{cases} \quad (35)$$

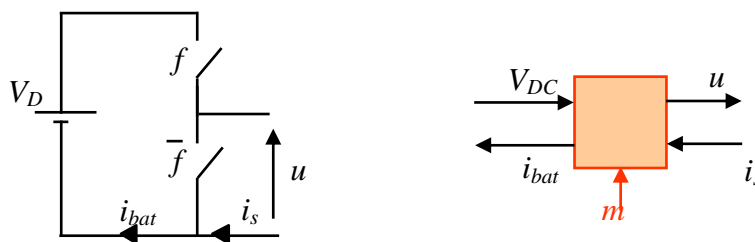


Figure 135 Exemple de convertisseur électrique : le hacheur

Les convertisseurs mécaniques - Le deuxième type de convertisseur est le convertisseur mécanique. Il permet de convertir un effort mécanique en un autre. Dans l'exemple du réducteur, le couple et la vitesse changent en fonction d'un rapport de réduction « k » qui est, en fait, le rapport du nombre de dents.

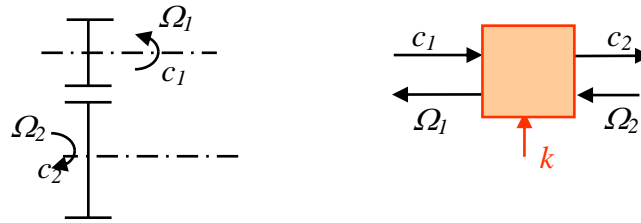


Figure 136 Exemple de convertisseur électrique : le réducteur

Les convertisseurs électromécaniques – Le troisième et dernier type de convertisseur est le convertisseur électromécanique. Il permet de convertir un effort mécanique en un signal électrique et inversement. Dans l'exemple de la machine à courant continu, le couple et la force électromotrice dépendent du courant et de la vitesse (36)(37).

$$\begin{cases} C = k_{\phi} i \\ e = k_{\phi} \Omega \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + r i = u - e \end{cases} \quad (37)$$

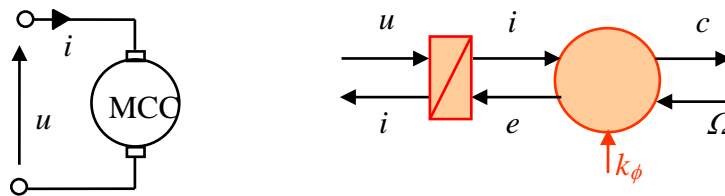


Figure 137 Exemple de convertisseur électromécanique : la machine à courant continu

Les éléments de couplage

Descriptif :

Définition : Ces éléments permettent comme leurs noms l'indiquent de coupler différentes parties entre elles.

Entrée / Sortie : ils disposent de 3 entrées et de 3 sorties

Pictogramme : double pictogramme imbriqué dépendant de la nature du couplage

Exemples :

Les éléments de couplage électrique - La présence d'un nœud de courant est visible avec une grande facilité :

- les tensions sont égales : V_{DC} est distribuée.

- les courants sont eux répartis en fonction de la charge. La loi des nœuds donne donc :

$$i = i_1 + i_2.$$

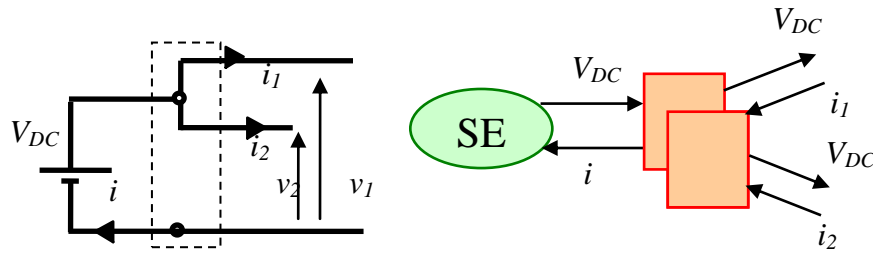


Figure 138 Exemple d'un couplage électrique : le nœud de courant

Les éléments de couplage mécanique - Le différentiel d'une voiture permet de répartir le couple issu du moteur dans les deux roues. De ce fait, les roues tournent à la même vitesse (hypothèse : pas de virage ni de glissement) et le couple est divisé en deux dans chaque roue :

$$\begin{cases} C_{tot} = C_{dif} / 2 \\ \Omega \text{ commun} \end{cases}$$

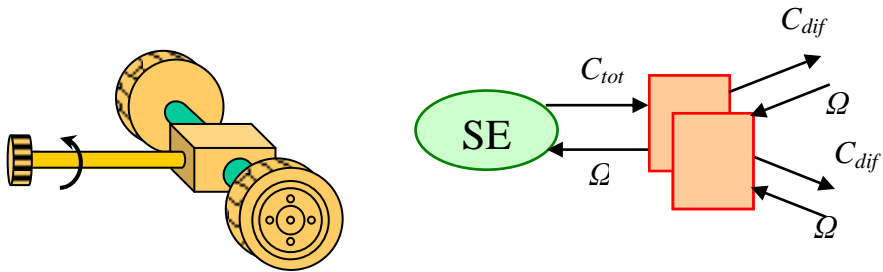
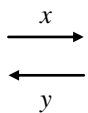
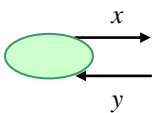
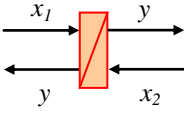
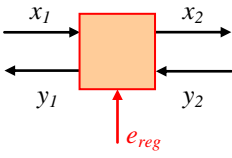
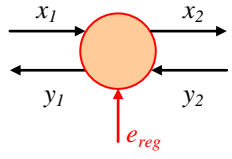
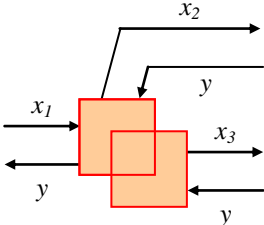
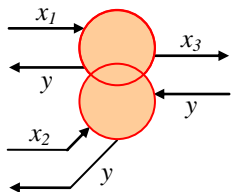
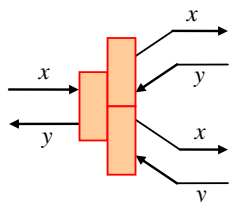
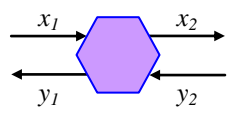


Figure 139 Exemple d'un couplage mécanique : le différentiel d'une voiture

Tableau 8. Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme REM (<http://www.emrwebsite.org>)

REM (Représentation Énergétique Macroscopique)			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Variable		variables d'action et de réaction	
Capteur	0	capteur placé sur une variable	
Source		source d'énergie réceptrice ou génératrice	alimentation électrique (continue, alternative), environnement d'un véhicule
Accumulateur		élément d'accumulation d'énergie (causalité intégrale) avec ou sans pertes	inductance, condensateur, inertie, masse
Convertisseurs		convertisseur mono-physique (sans accumulation d'énergie) avec ou sans entrée de réglage et avec ou sans pertes	transformateur électrique, convertisseur électrique, réducteur, engrenage, roue
		convertisseur multi-physique (sans accumulation d'énergie) avec ou sans entrée de réglage et avec ou sans pertes	machine à courant continu à excitation séparée
Couplages		couplage mono-physique (distribution d'énergie) avec ou sans pertes	couplage série (équicourant), parallèle (équitension), poulie-courroie (équivitesse)
		couplage multi-physique (distribution d'énergie) avec ou sans pertes	machine électrique
Aiguilleur		aiguilleur de modèles (aiguillage d'énergie quelconque)	système physique pouvant faire varier le nombre de grandeurs d'états
Estimateur		modèle ou estimateur (quelle que soit la forme)	

Annexe D : Règles d'inversion de la REM

L'objectif est de savoir déterminer la structure de commande d'un système énergétique. Une commande est en fait l'inversion de la fonctionnalité d'un système. La S.M.C. propose une structuration de la commande avec un maximum d'opérations et de capteurs. Elle constitue un intermédiaire théorique pour définir une structure pratique de commande.

Eléments constitutifs de la SMC

Les éléments de la commande sont représentés par un parallélogramme bleu clair contour bleu foncé.

Tableau 9 : Eléments constituant la SMC (<http://www.emrwebsite.org>)

Inversions		inversion d'un élément de conversion avec e_{reg} comme entrée de perturbation (sans asservissement)	
		inversion d'un élément de conversion avec x_1 comme entrée de perturbation (sans asservissement)	
Inversions		inversion d'un élément avec accumulation d'énergie (avec asservissement)	
		inversion d'un couplage aval (répartition des énergies)	
		inversion d'un couplage amont (pondération des énergies)	
		inversion d'un aiguilleur de modèles (aiguillage de l'énergie)	
Stratégie		détermine les critères de répartition k_R, les critères de pondération k_P, et les références	

Annexe E : Plateforme d'expérimentation de la salle eV

La plateforme utilisée par l'équipe commande du L2EP est située dans la salle nommée eV (électricité et Véhicule). Cette plateforme dispose dans le cadre de simulations de diverses installations :

- 2 baies de commande disposant d'une carte dSPACE 1005 et de cartes périphériques, et d'une carte dSPACE 1103
- 4 onduleurs (3 bras) de 50 kW et 4 onduleurs de 10 kW
- 2 bancs machine électrique de 1,5 kW (synchrone, asynchrone, courant continu)
- 1 banc machine de 22 kW (synchrone et asynchrone)
- 1 banc machine de 10 kW (synchrone et à courant continu)
- 1 banc de batterie plomb + chargeur,
- 1 banc de batterie NiMH + chargeur,
- 1 banc de supercondensateurs MAXWELL
- 1 banc de supercondensateurs BATSCAP

Baies de câblage

Les baies de câblage utilisées lors de l'étape HIL de cette thèse sont composées :

- d'un ensemble de cartes dSPACE connectées dans une « expansion box » type PX-10. Cinq cartes dSPACE y sont présentes :
- une carte processeurs DS 1005,
- une carte de génération de signaux numérique DS 5101,
- d'une carte d'entrées / sorties numériques DS 4003,
- de deux carte d'entrées / sorties analogiques DS 2003 et DS 2004,
- d'une carte d'acquisition de signaux en provenance des capteurs de position DS 3001.
- d'électronique de puissance :
- 4 ponts de diodes,
- 4 onduleurs.
- des capteurs de tension sont placés à chaque sortie des ponts de diodes,
- des capteurs de courant sont placés sur chaque bras d'onduleur,
- de contacteurs en entrée de chaque pont de diodes et en sortie de chaque onduleur,
- de deux bancs de supercondensateurs par baie.

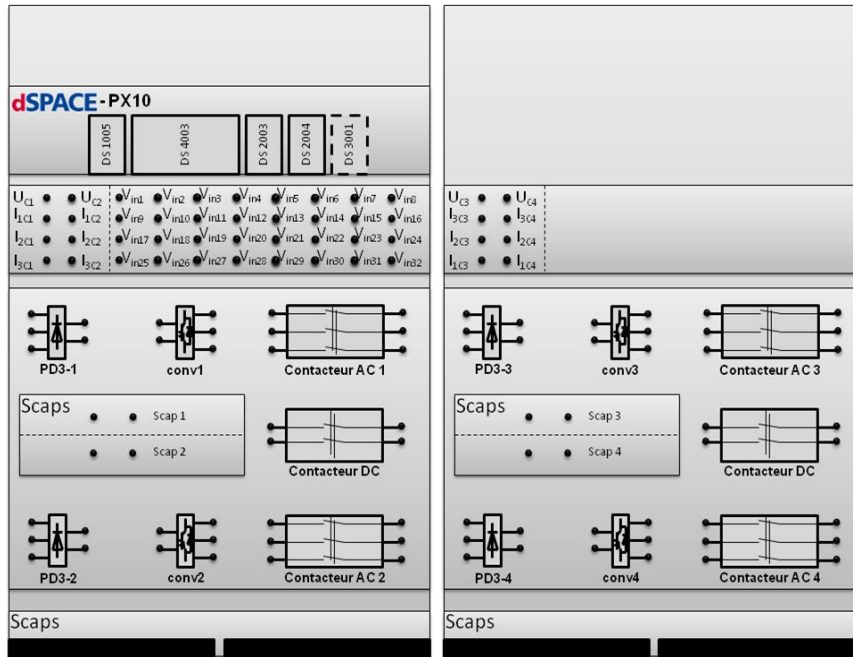


Figure 141 Schéma des deux baies utilisées

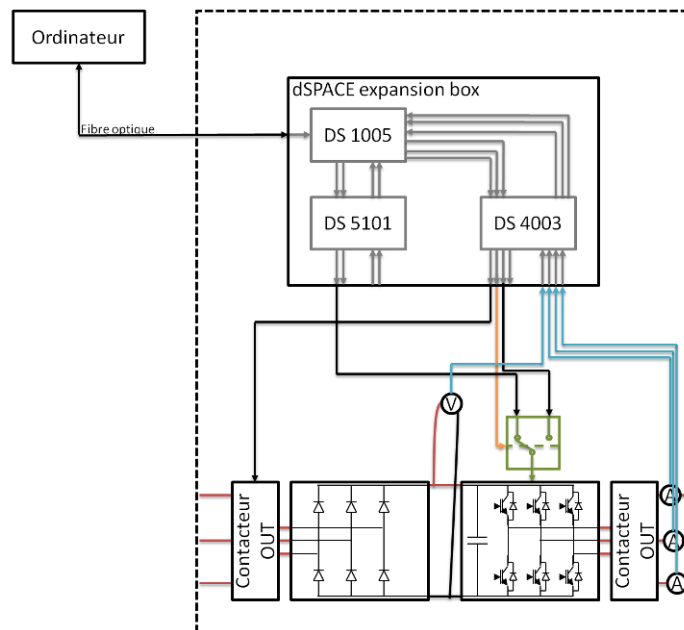


Figure 142 Câblage interne des baies de câblage

Bancs machines

Banc machine faible puissance - La plateforme eV dispose de deux bancs machine faible puissance 1.5 kW. Ces deux bancs sont constitués de :

- d'une machine synchrone de 1,5 kW,
- d'une machine asynchrone à bague de 1.5 kW,
- d'une machine à courant continu à excitation séparée de 1.5kW.
- d'un codeur incrémental
- d'une dynamo tachymétrique.



Figure 143 Schéma des bancs de 1,5 kW

Banc machine forte puissance - Dans le cadre de cette thèse deux nouveaux bancs machines ont été acquis. Le premier est un banc de 22kW disposant :

- d'une machine synchrone à aimants permanents de 22 kW,
- d'une machine asynchrone de 22 kW,
- d'un capteur de position type codeur incrémental
- d'une dynamo tachymétrique.



Figure 144 Schéma du banc de 22 kW

Le deuxième est un banc de 10kW disposant :

- d'une machine synchrone à aimants permanents de 10 kW,
- d'une machine à courant continu de 14 kW,
- d'un capteur de position type codeur incrémental
- d'une dynamo tachymétrique.



Figure 145 Schéma du banc de 10 kW

Abréviations

BV	Boite de Vitesse
CEM	Compatibilité Electro-Magnétique
CdT	Chaîne de traction
CO2E	Contrôle Optimisation Energie et Emission
DRIA	Département de la Recherche et de l'Innovation Automobile
GIC	Graphe Informationnel Causal
GMP	Groupe Moto-Propulseur
HIL	Hardware-In-the-Loop
I	Interface
IVC	Interprétation de la Volonté du Conducteur
MEGEVH	Modélisation Energétique et Gestion d'Energie de Véhicules Hybrides
MELar	Machine ELectrique Arrière
MELav	Machine Electrique Avant
MTH	Moteur Thermique
REM	Représentation Energétique Macroscopique
RepVHP	Représentation Véhicule Hybride Parallèle
eV	électricité & Vehicle
SMC	Structure Maximale de Commande
SimVHP	Simulation Véhicule Hybride Parallèle
VEH	Véhicule Electrique Hybride

A

- [ADEME 2007] AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, INRETS, J.M. JANCOVICI - "Bilan Carbone : Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées" - Janvier 2007.
- [ADEME 2012] AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE - "Véhicules particuliers vendus en France : Evolution du marché, caractéristiques environnementales et techniques" - Brochure, Edition 2012.
- [Aksas 2006] S. AKSAS - "Electric Motor HIL-Simulation for automotive application: solutions, limitations, requirements" – EMR summer school 2006 : Modelling and control of electrical systems, Lille, France, Novembre 2006.
- [Allègre 2010a] A. L. ALLÈGRE, A. BOUSCAYROL, J. N. VERHILLE, P. DELARUE, E. CHATTOT, S. EL FASSI - "Reduced-scale power Hardware-In-the-Loop simulation of an innovative subway" - IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, issue: 4, p. 1175-1185, 2010.
- [Allègre 2010b] A.L. ALLEGRE, "Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides », thèse de doctorat, Université de Lille 1, Lille, France, 2010 (dans le cadre de MEGEVH).
- [Autonomie 2012] <http://www.autonomie.net> - Site internet officiel du logiciel autonomie - 2012.
- [Aziz 2011] A. AZIZ, M.S. SHAFQUAT, M.A. QURESHI, I. AHMAD - "Performance analysis of power split hybrid electric vehicles using autonomie" - IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd) - Putrajaya, Malaysia, December 2011.

B

- [Baert 2011] J. BAERT, J. J. POUGET, D. HISSEL, M.-C. PERA – "Energetic Macroscopic Representation of a hybrid railway powertrain" - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2011, Chicago, IL, USA, September 2011.
- [Beretta 2007] J. BERETTA – "Electronique, électricité et mécatronique automobile" - Hermes Science Publications, ISBN-10: 2746212455, Novembre 2007
- [Boulon 2009] L. BOULON - "Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie" - thèse de doctorat, Université de Franche Comté, Belfort, France, Juillet 2009 (dans le cadre de MEGEVH).

- [Bouscayrol 2003] A. BOUSCAYROL - “Formalismes de représentation et de commande des systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs” - HDR de l'Université de Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, Décembre 2003.
- [Bouscayrol 2005] A. BOUSCAYROL, G. DAUPHIN-TANGUY, R. SCHOENFELD, A. PENNAMEN, X. GUILLAUD, G.-H. GEITNER - “Different energetic descriptions for electromechanical systems” - EPE'05, Dresden (Germany), September 2005.
- [Bouscayrol 2006] A. BOUSCAYROL, W. LHOMME, P. DELARUE, B. LEMAIRE-SEMAIL, S. AKAS - “Hardware-In-The-Loop simulation of electric vehicle traction systems using Energetic Macroscopic Representation” - IEEE-IECON'06, Paris, France, p. 5319-5324, November 2006.
- [Bouscayrol 2009] A. BOUSCAYROL - “Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control Illustrated on a Wind-Energy-Conversion System Using Hardware-in-the-Loop Simulation” - IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, issue: 12, p. 4826 - 4835, 2009.
- [Bouscayrol 2010a] A. BOUSCAYROL, W. LHOMME, C. DEMIAN, A.L. ALLÈGRE, E. CHATTOT, S. EL FASSI - “Experimental set-up to test the power transfer of an innovative subway using supercapacitors”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2010, Lille, France, September 2010.
- [Bouscayrol 2010b] A. BOUSCAYROL - “Hardware-In-the-Loop simulation” - Industrial Electronics Handbook, second edition, tome 3, Chapter M35, Editions Taylor & Francis, Chicago, ISBN. 9781848210967, December 2010.
- [Bosch 1991] R. BOSCH GMBH- “CAN Specification, Version 2” - Sept. 1991.
- [Bruyère 2008] A. BRUYERE, E. SEMAIL, A. BOUSCAYROL, F. LOCMONT, J.M. DUBUS, J.C. MIPO - “Modeling and control of a seven-phase claw-pole integrated starter alternator for micro-hybrid automotive applications” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, September 2008.
- [Burbank 2011] J. BURBANK, W. KASCH, J. WARD - Chapter 6 : “Hardware-in-the-Loop Simulations” - An introduction to network modeling and simulation for the practicing engineer, Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, 2011.

C

- [Cakmakci 2011] M. CAKMAKCI, L. YONGHUA, L. SHUZHEN - “Model-in-the-loop development for fuel cell vehicle” - American Control Conference (ACC) 2011, San Francisco, USA, p. 2462 - 2467, 2011.
- [Chan 2007] C.C. CHAN - “The state of art of electric, hybrid and fuel cell vehicles” - Proceedings of the IEEE, vol. 95, April 2007.
- [Chan 2009] C.C. CHAN, Y.S. WONG, A. BOUSCAYROL, K. CHEN - “Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Point of View]” - Proceedings of the IEEE, vol. 97, issue:4, p. 603-607, 2009.

-
- [Chan 2010] C.C. CHAN, A. BOUSCAYROL, K. CHEN - “Electric, Hybrid and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling” - IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, issue:2, p. 589-598, 2010.
- [Chau 2007] K.T.CHAU, C.C. CHAN - “Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid electric vehicles” - Proceedings of the IEEE, vol. 95, p. 821 – 835, April 2007.
- [Chen 2009] K. CHEN - “Common Energetic Macroscopic Representation and unifier control structure for different Hybrid Electric Vehicle” - thèse de doctorat, Université de Lille 1, Lille, France , Mai 2009 (dans le cadre de MEGEVH).
- [Chen 2010] K. CHEN, R. TRIGUI, A. BOUSCAYROL, E. VINOT, W. LHOMME, A. BERTHON - “A common model validation in the case of the Toyota Prius II” – IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, USA, September 2010.
- [Cheng 2009] L. CHENG, Z. LIPENG – “Hardware-in-the-loop simulation and its application in electric vehicle development” – IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, p. 1-6, 2008
- [Cheng 2011] Y. CHENG, R. TRIGUI, C. ESPANET, A. BOUSCAYROL, S. CUI - “Analysis of Technical Requirements from the Toyota Prius II for the Design of a PM-EVT” - IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 6, p. 4106-4114, November 2011
- [Choi 2012] C. CHOI, W. LEE – “Analysis and Compensation of Time Delay Effects in Hardware-in-the-Loop Simulation for Automotive PMSM Drive System” – IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, issue: 9, p. 3403-3410, 2012.

D

- [Dauphin-Tanguy 1999] G. DAUPHIN-TANGUY – “Les bond graphs et leur application en mécatronique” – Techniques de l’Ingénieur, vol. s1, p. 1-24, Septembre 1999.
- [Dauphin-Tanguy 2000] G. Dauphin-Tanguy – “Les bond graphs” – Ouvrage collectif, collection IC2, Hermès, Septembre 2000.
- [Delarue 2010] P. DELARUE, A. BOUSCAYROL, P. BARRADE – “Energetic Macroscopic representation and PSIM[®] simulation: Application to a DC/DC converter input filter stability” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2010, Lille, France, September 2010.
- [Demers 2007] S. DEMERS, P. GOPALAKRISHNAN, L. KANT – “A Generic Solution to Software-in-the-Loop” - IEEE Military Communications Conference, 2007, Baltimore, p. 1 – 6, 2007.
- [Drozd 1991] W. DROZDZ – “Development and validation of a bond graph handling model of an automobile” – Journal of the Franklin Institute, vol. 5, p. 941-957, 1991.

E

- [Ehsani 2005] M. EHSANI , Y. GAO , S.E. GAY, A. EMADI - “Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design” - CRC Press, ISBN-10: 0849331544, 2005.
- [Ehsani 2007] M. EHSANI, Y. GAO, J.M. MILLER - “Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives” - Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4 p. 719-728, April 2007.

F

- [Filippa 2005] M. FILIPPA, C. MI, J. SHEN, RC. STEVENSON - “Modeling of a HEV powertrain test using Bongraphs” – IEEE Transactions on Vehicular technology, vol. 54, issue 3, May 2005.
- [Fritzson 2011] P. FRITZSON - “Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica” - John Wiley & Sons Inc, September 2011.

G

- [Gao 2005] Y. GAO, M. EHSANI, J.M. MILLER - “Hybrid Electric Vehicle: Overview and state of the Art” - IEEE International Society for Industrial Ecology, Dubrovnik, Croatia, June 2005.
- [Gauchia 2010] L. GAUCHIA, J. SANZ – “A Per-Unit Hardware-in-the-Loop Simulation of a Fuel Cell/Battery Hybrid Energy System” – IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, issue: 4, p. 1186 – 1194, 2010.
- [Grenelle 2010] Grenelle du ministère de l’écologie, de l’énergie, du développement durable et de l’aménagement du territoire - “TRANSPORTS : développement de transports en commun propres” - Novembre 2010.
- [Grondin 2011] O. GRONDIN, L. THIBAUT, P. MOULIN, A. CHASSE, A. SCIARRETTA – “Energy management strategy for Diesel hybrid electric vehicle” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2011, Chicago, USA, p. 1-8, 2011.

H

- [Hautier 1996] J. P. HAUTIER, J. FAUCHER - “Le graphe informationnel causal” - Bulletin de l’Union des Physiciens, vol. 90, pp 167-189, Juin 1996.
- [Hautier 2004] J.P. HAUTIER AND P.J. BARRE - “The causal ordering graph – A tool for modelling and control law synthesis” - Studies in Informatics and Control Journal, vol. 13, no. 4, p. 265 – 283, December 2004.
- [Harris 2009] A. HARRIS - “Food for fuel” - Engineering & Technology, vol. 4, issue: 19, p. 53 2009.
- [Heinzmann 2010] S. HEINZMANN - “Die visuelle Biografie Ferdinand Porsche 1875-1951” - Tredition Gmbh edition, December 2010.

-
- [Honda 2012] <http://automobiles.honda.com>, - "How FCX Clarity FCEV Works?" - Document internet, 2012.
- [Horrein 2011] L. HORREIN, V. DERACHE, A. BOUSCAYROL, J. N. VERHILLE, P. DELARUE, - "Different Models of the Traction System of an Automatic Subway" - Electrimacs'11, Cergy Pontoise, France, June 2011.
- [Horrein 2012a] L. HORREIN, A. BOUSCAYROL, M. EL FASSI - "Thermal Energetic Model of an Internal Combustion Engine for Simulation of an Thermal Vehicle" - VPPC'12, Seoul, Korea, October 2012
- [Horrein 2012b] L. HORREIN, A. BOUSCAYROL, P. DELARUE, J. N. VERHILLE, C. MAYET - "Forward and Backward Simulation of a Power Propulsion System" - PPPSC'12, Toulouse, France, September 2012

I

- [Isermann 1999] R. ISERMANN, J. SCHAFFNIT, S. SINSEL - "Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine control systems" - Control Engineering practice, vol.7, no. 5, p. 643-653, May 1999.

J

- [Jaume 1998] D. JAUME, M. VERGE, M. DELHOM, P. ROYER - "Bond Graph modelling: a good communication tool between University and Industry" - Proceedings of ICEE, Rio de Janeiro, Brazil, 1998.
- [Jere 2011] W.A. JERE - "AMESim" - Equ Press Publisher, August 2011.
- [Jin Hong 2010] J. JIN HONG, K. JONG-YUL, K. HAK-MAN, K. SEUL-KI, C. CHANGHEE, K. JANG-MOK, A. JONG-BO, N. KEE-YOUNG - "Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid" - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, issue: 12, p. 2919 - 2929, 2010.

K

- [Kapila 2007] V. KAPILA - "Simdriveline [Product spotlight]" - IEEE Control systems, vol. 27, issue:3, p. 110-111, 2007.
- [Karady 2005] G. KARADY, K. HOLBERT - "Appendix D: Introduction to PSpice" - Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach, 2005.
- [Karnopp 1968] D. KARNOPP, R.C. ROSENBERG - "Analysis and simulation of multiport systems: the bond graph approach to physical system dynamics" - M.I.T. Press, ASIN: B0000COC17, 1968.
- [Kermani 2011] S. KERMANI, R. TRIGUI, B. JEANNERET, T.M. GUERRA - "PHIL Implementation of Energy Management Optimization for a Parallel HEV on a Predefined Route" - IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 60, issue: 3, p. 782 - 792, 2011.

- [Kepner 2002] R.P. KEPNER - "Hydraulic power assist – a demonstration of Hydraulic Hybrid Vehicle regenerative braking in a road vehicle application" - Society of Automotive Technical Paper Series, 2002.
- [Kim 2005] D. KIM, S. HWANG, H. KIM - "Rear motor control for a 4WD hybrid electric vehicle stability" - IEEE Vehicular Electronics and Safety Conference, Xi'an, Shaan'xi, China, 14-16 October 2005.
- [Kim 2008] D. KIM, S. HWANG, H. KIM - "Vehicle stability enhancement of four-wheel-drive hybrid electric vehicle using rear motor control" - IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 57, issue : 2, p. 727-735, March 2008
- [Krug 1997] M. KRUG, A. SCHENDL - "New Demands for In-Vehicle Networks" - Euromicro: Proc. of the Euromicro Conference, vol. 23, p. 601-605, 1997.

L

- [Leclercq 2004] A. LECLERCQ, P. SICARD, A. BOUSCAYROL, B. LEMAIRE-SEMAIL – "Control of a triple drive paper system based on the Energetic Macroscopic Representation" - IEEE-ISIE'04, Ajaccio (France), p. 889-893, May 2004.
- [Lemeilleur 2009] W. LEMEILLEUR, E. NOIRTAT, N. JALJAL, F. MERCIER-CALVAIRAC – "Moyen méthodologique innovant validé pour utilisation par les métiers - Développement d'outils unifiés pour la simulation et le post-traitement SimVHP" – Note internet PSA Peugeot Citroën, Avril 2009
- [Letrouvé 2009a] T. LETROUVE, A. BOUSCAYROL, P. DELARUE - "Modélisation fonctionnel et stratégie de gestion de l'énergie pour une véhicule type HY motion 4 au travers de la REM" - Livrable final PSA Peugeot Citroën, Juillet 2009.
- [Letrouvé 2009b] T. LETROUVE, P. DELARUE, A. BOUSCAYROL - "Modelling and control of a double parallel hybrid electric vehicle using Energetic Macroscopic Representation" - Electromotion Symposium, Lille, France, July 2009.
- [Letrouvé 2010] T. LETROUVE, A. BOUSCAYROL, W. LHOMME, N. DOLLINGER, F. MERCIER CALVAIRAC - "Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation" - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, September 2010.
- [Letrouvé 2011] T. LETROUVE, W. LHOMME, A. BOUSCAYROL, N. DOLLINGER, F.M. CALVAIRAC - "Inversion-based control of a double parallel Hybrid Electric Vehicle: Validation in a structural software" - Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, USA, September 2011.
- [Letrouvé 2012] T. LETROUVE, A. BOUSCAYROL, W. LHOMME, N. DOLLINGER, F. MERCIER CALVAIRAC - "Reduced-scale Hardware-In-the-Loop Simulation of a Peugeot 3008 HYbrid4 vehicle" IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2012, Seoul, Korea, October 2012, 3rd Prize Paper Award.

-
- [Letrouvé 2013] T. LETROUVE, A. BOUSCAYROL, W. LHOMME, N. DOLLINGER - “Control validation of Peugeot 3008 Hybrid4 vehicle using a reduced-scale power HIL simulation” - Journal of Electrical Engineering and Technology, submitted, 2013.
- [Lhomme 2006] W. LHOMME, R. TRIGUI, P. DELARUE, B. JEANNERET, A. BOUSCAYROL, F. BADIN - “Switched Causal Modeling of Transmission with Clutch in Hybrid Electric Vehicles” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, September 2006.
- [Lhomme 2007a] W. LHOMME, R. TRIGUI, A. BOUSCAYROL, P. DELARUE, B. JEANNERET, F. BADIN - “Inversion-based control of a vehicle with a clutch using a switched causal modelling” - International Journal of Systems Science, vol. 42, no. 2, p. 319–334, February 2011.
- [Lhomme 2007b] W. LHOMME - “Gestion d’énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique” - thèse de doctorat, Université de Lille 1, Lille, France, Novembre 2007.
- [Lhomme 2008] W. LHOMME, M.J. HANCOCK, F. ASSADIAN, D. CIESLAR - “Multi-model of a hybrid electric vehicle’s four-wheel drive system with automatically-engaging clutch” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, September 2008.
- [Lilas 2012] <http://www.Lilas-autopartage.fr> - “Tout savoir sur Lilas – Le concept”, 2012.
- [Liu 2007] R. LIU, A. MONTI, G. FRANCIS, R. BURGOS, F. WANG, D. BOROYEVICH – “Implementing a Processor-in-the-loop with a Universal Controller in the Virtual Test Bed” - IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007, p. 945 – 950, 2007.
- [Lu 2007] B. LU, X. WU, F. FIGUEROA, A. MONTI – “A Low-cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls” – IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, issue: 2, p. 919-931, 2007.

M

- [Maclay 1997] D. MACLAY - “Simulation gets into the loop” - IEEE Review, p. 109-112, May 1997.
- [Markel 2002] T. MARKEL, A. BROOKER, I. HENDRICKS, V. JOHNSON, K. KELLY, B. KRAMER, M. O’KEEFE, S. SRPIK, K. WIPKE - “ADVISOR: A systems analysis tool for advanced vehicle modeling” – Journal of Power Sources, vol. 110, issue :2, p. 255-266, 2002.
- [Mayet 2012] C. MAYET, M. MEJRI, A. BOUSCAYROL, J. POUGET, Y. RIFFONNEAU – “Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based Control of the Traction System of a Hybrid Locomotive” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Seoul, Korea, October 2012.

- [Meeker 2005] D. MEEKER - "User manual for finite element method magnetics – FEMM" - 2005.
- [MEGEVH 2007] A. BOUSCAYROL, S. DELPRAT, D. HISSEL, R. TRIGUI - "MEGEVH project : Graphical modelling for energy management for hybrid electric vehicles" - EET'07, Brussel, Belgium, June 2007.
- [MEGEVH 2012] <http://12ep.univ-lille1.fr/megevh/>- Site internet officiel du réseau national MEGEVH - 2012.
- [Ministère 2010] MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DE L'ENERGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE - "Etudes & documents : CO2 et activités économiques de la France, Tendances 1990-2007 et facteurs dévolution" - 2010.
- [Moawad 2011] A. MOAWAD, A. ROUSSEAU – "Impact of vehicle performance on cost effective way to meet CAFE 2017–2025" - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, USA, October 2011.
- [Munteanu 2007] I. MUNTEANU, S. BACHA, A.I. BRATCU, J. GUIRAUD, D. ROYE - "Conception systématique des simulateurs temps réel Hardware-in-the-Loop Application aux systèmes de conversion éolienne", Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 41, p. 1139-1164, 2007.

N

- [Naderi 2008] P. NADERI, S.M.T. BATHAEE, R. HOSEINNEZHAD - "Driving / regeneration and stability driver assist in 4WD Hybrid vehicles" - Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008.

O

- [Ould 2006] B. OULD - "Modélisation par bond graph - Application aux systèmes énergétiques" – Technique de l'ingénieur, Avril 2006.

P

- [Paynter 1961] H.M. PAYNTER – "Analysis and design of engineering systems" - MIT Press, 1961
- [Peugeot 2012] Dossier de presse HYbrid4 Technology – "L'hybride diesel – HYbrid4 une technologie inédite pour une voiture sans compromis" - 2012
- [Pouget 2012] J. POUGET, Y. RIFFONNEAU – "Signal Hardware-In-the-Loop Simulator of Hybrid Railway Traction for the Evaluation of Energy Management" – IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Seoul, Korea, October 2012.
- [PREDIT 2011] PREDIT - "Les motorisations hybrides" - Assemblée nationale, avril 2011.
- [Prensier 2004] J.L. PRENSIER - "Vélos à assistance au pédalage électrique" - Sciences de l'ingénieur, Janvier 2004.

[Prixdubaril 2011] <http://www.prixdubaril.com> - “cours officiel du baril de pétrole en 2011” - Site internet, 2011.

R

- [Rabbath 2002] C. A. RABBATH, M. ABDOUNE, J. BELANGER, K. BUTTS - “Simulating hybrid dynamic systems” - IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 9, no. 2, p. 39 – 47, 2002.
- [Raghavan 2012] S.S. RAGHAVAN, A. KHALIGH – “Electrification Potential Factor: Energy-Based Value Proposition Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicles” - IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, issue:3, p. 1052-1059, 2012.
- [Ruelland 2002] R. RUELLAND - “Apport de la co-simulation dans la conception de l’architecture des dispositifs de commande numérique pour les systèmes électriques” - thèse de doctorat, Toulouse, France, Septembre 2002.

S

- [Shidore 2011] N. SHIDORE, A. ICKES, T. WALLNER, A. ROUSSEAU, M. EHSANI – “Evaluation of ethanol blends for PHEVs using engine-in-the-loop” - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, USA, October 2011.
- [SMM 2000] Projet SMM, A. BOUSCAYROL, B. DAVAT, B. DE FORNEL, B. FRANÇOIS, J. P. HAUTIER, F. MEIBODY-TABAR, M. PIETRZAK-DAVID – “Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives” - European Physics Journal - Applied Physics, vol. 10, no. 2, p. 131-147, May 2000 (common paper GREEN Nancy, L2EP Lille and LEEI Toulouse, according to the SMM project of the GDR-SDSE).
- [Song 2005] H-S. SONG, K. NAM, H-R CHOI, H-G KIM - “A new topology and control scheme for a 4WD HEV using a DFIM with a reduced size converter-inverter” - Industry Applications Conference, October 2005.
- [Surhone 2010] L.M. SURHONE, M.T. TENNOE, S.F. HENSSONOW - “Dymola” - VDM Publishing editor, 2010.
- [Syed 2012] S.A. SYED - “Energetic Macroscopic Representation and Multi-level energy management for heavy-duty Hybrid Vehicles using double planetary geartrain” - Thèse de doctorat, Université de Lille 1, Lille, France, Mai 2012 (dans le cadre de MEGEVH).

T

- [Terwiesch 1999] P. TERWIESCH, T. KELLER, E. SCHEIBEN - “Rail vehicle control system integration testing using digital hardware-in-the-loop simulation” - IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 7, no. 3, p. 352-362, May 99.
- [Thiffault 2004] C. THIFFAULT, P. SICARD, A. BOUSCAYROL – “Tension control loop using a linear actuator based on the Energetic Macroscopic Representation” - IEEE-CCECE'04, Niagara Falls (Canada), vol. 4, p. 2041-2046, May 2004

- [Thoma 1975] J. THOMA - “Bond graphs: introduction and applications” - Elsevier Science, 1975.
- [Tiller 2001] M. TILLER - “Introduction to Physical Modeling With Modelica” - Kluwer international series in engineering and computer science, Springer editor, vol. 615, 2001.
- [Tritschler 2010] P. J. TRITSCHLER, S. BACHA, E. RULLIERE, G. HUSSON – “Energy management strategies for an embedded fuel cell system on agricultural vehicles” - 19th International Conference on Electrical Machines, 2010.
- [Trigui 2004] R. TRIGUI, B. JEANNERET, F. BADIN - “Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB” - Recherche Transports Sécurité 83, 2004.
- [Trigui 2009] R. TRIGUI, B. JEANNERET, B. MALAQUIN, C. PLASSE – “Performance Comparison of Three Storage Systems for Mild HEVs Using PHIL Simulation” - IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, issue:8, p. 3959-3969, 2009
- [Trigui 2011] R. TRIGUI – “Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques - électriques” – Habilitation à Diriger la Recherche, Université Lille 1, Septembre 2011.

U

- [UTP 2010] UNION DES TRANSPORTS PUBLIC - “Les chiffres clés du transport public 2010” – éditeur UTP, Octobre 2010.

V

- [Vélib 2011] VELIB, MAIRIE DE PARIS - “Les 5 ans du vélib” - Dossier de Presse, 2011.
- [Vergé 2004] M. VERGE, D. JAUME - “Modélisation structurée des systèmes avec les bond graphs” - Méthodes et pratiques de l'ingénieur, Editions Technip, 2004.
- [Verhille 2004] J. N. VERHILLE, J. C. MERCIÉCA, A. BOUSCAYROL - “Energetic Macroscopic Representation of a subway traction system for a simulation model” - IEEE-ISIE'04, Ajaccio, France, May 2004.
- [Verhille 2007a] J-N VERHILLE - “REM du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion” – Thèse de doctorat, ENSAM, Lille, France Juillet 2007.
- [Verhille 2007b] J.N. VERHILLE, A. BOUSCAYROL, P.J. BARRE, J.P. HAUTIER – “Hardware-in-the-loop simulation of the traction system of an automatic subway” – European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, September 2007.
- [Vinot 2008] E. VINOT, J. SCORDIA, R. TRIGUI, B. JEANNERET, F. BADIN - “Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius” -

International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, vol. 3, no.3, p. 139-166, 2008.

[Voelcker 2011] J. VOELCKER - "Chevy Volt sparks a series of plug-in hybrids" - IEEE Spectrum, vol. 48, issue: 2, p. 16 – 18, 2011.

W

[Wagener 2007] A. WAGENER, T. SCHULTE, P. WAELTERMANN, H. SCHUETTE - "Hardware-in-the-Loop test systems for electric machines in advanced powertrain applications" - SAE'07, Detroit, USA, February 2007.

[Wand 2006] G. WAND - "Fuel Cell History, Part 2" - Fuel Cell Today website, April 2006.

X

[Xing 1999] W. XING, H. CHEN, AND H. DING - "The Application of Controller Area Network on Vehicle" - Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference, vol. 1, p. 455-458, September 1999.

Z

[Zanasi 2010] R. ZANASI – "The Power-Oriented Graphs technique: System modeling and basic properties" – IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2010, Lille, France, September 2010.

