

Gestion énergétique optimale au service de la conception de chaînes de traction hybrides

Francis Roy^{1,2}, Florence Ossart², Claude Marchand²

1 PSA Peugeot Citroën, La Garenne-Colombes, France, e-mail : francis.roy1@mps.com

2 Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEPE), CNRS UMR8507, SUPELEC, UPMC, Univ. Paris-Sud, Plateau de Moulon 91192 Gif sur Yvette, France, e-mail: florence.ossart@lgepe.supelec.fr, claude.marchand@lgepe.supelec.fr

RESUME - Les préoccupations environnementales croissantes liées aux émissions de gaz à effet de serre et la raréfaction des énergies fossiles amènent les constructeurs automobiles à proposer des véhicules de plus en plus efficaces. La présente étude compare objectivement les performances en émissions de CO₂ de différentes architectures de chaînes de traction hybrides électriques (série, parallèle et combinée) pour identifier les spécifications d'une architecture optimale. Elle est construite à partir du calcul de la consommation minimale atteignable par chaque chaîne de traction sur différents cycles (homologation et cycles représentatifs d'usages clients). A cet effet, une stratégie de commande optimale reposant sur un algorithme de programmation dynamique a été mise en œuvre. A chaque instant des cycles suivis, les sollicitations des différents organes sont déterminées et analysées afin de spécifier leur dimensionnement optimal. Cette approche permet d'identifier les axes d'améliorations tant sur le plan de l'architecture de la chaîne de traction que sur la conception des organes.

Mots-clés— HEV(Véhicule Hybride Electrique), Chaînes de traction, Gestion énergétique, Conception de machines électriques.

1. INTRODUCTION

La demande croissante de mobilité avec ses conséquences sur la diminution des ressources en énergie fossile et l'augmentation des émissions de gaz à effets de serre et autres polluants engendre une profonde mutation technologique pour la conception des moyens de locomotion. Aussi le challenge de l'industrie automobile est de développer des technologies innovantes pour proposer sur le marché des véhicules propres, à faible empreinte carbone et à un prix acceptable pour le client. C'est ainsi que tous les constructeurs automobiles ont abordé le 21^{ème} siècle en accentuant la recherche et le développement de chaînes de traction hybrides [1].

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans cette démarche et ont pour objectif d'identifier des voies de progrès pour la définition de futures chaînes de traction à haut rendement énergétique en ciblant le potentiel qu'offre l'hybridation thermique/électrique. En effet, cette hybridation permet de tirer profit des atouts des 2 types de motorisations :

- absence d'émissions (sonores et polluantes), très bon rendement et réversibilité des machines électriques
- forte densité énergétique des carburants fossiles qui garantit une large autonomie, limite la masse

embarquée et réduit le temps de ravitaillement (~3mn pour 60l).

On constate une augmentation rapide de l'offre de véhicules hybrides et chaque constructeur développe sa propre architecture [2]. Il est donc intéressant de comparer objectivement les grands principes d'hybridation pour orienter la conception d'une chaîne de traction optimale.

Cette étude concerne plus particulièrement un véhicule du segment B (type Peugeot 208), full-hybrid sans recharge sur secteur. Elle compare les potentiels offerts par les principales architectures de chaînes de traction hybrides: série, parallèle et combinée. Le critère de comparaison est la consommation minimale théorique atteignable sur différents cycles de conduite: cycle d'homologation et cycles représentatifs des usages clients en environnement urbain, routier ou autoroutier (cycles INRETS¹) [3, 4]. La consommation minimale sur cycle donné est calculée en appliquant aux différents modèles de chaîne de traction un algorithme de commande optimale basé sur la programmation dynamique [5-7]. Les résultats obtenus donnent une vision d'ensemble du comportement des différents systèmes en termes d'émission de CO₂ d'une part, et de sollicitations des différents organes d'autre part [8]. Il est alors possible d'identifier des critères de conception permettant d'optimiser la chaîne de traction, tant par le choix de l'architecture du système que par la définition des organes.

2. MODELISATION DES CHAINES DE TRACTION ET GESTION ENERGETIQUE OPTIMALE

2.1. Architecture des chaînes de traction

La Fig. 1 présente les différentes chaînes de traction étudiées. L'ensemble du système est considéré, du réservoir de carburant aux roues. Il est composé des éléments suivants : le moteur thermique, une ou deux machines électriques, des organes de couplage mécanique (réducteurs de vitesse, embrayage).

L'hybridation série correspond à une chaîne de traction électrique alimentée par un groupe électrogène. L'absence de couplage mécanique entre le moteur thermique et les roues permet de faire fonctionner le moteur thermique à ses points de

¹ INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité a fusionné le 1^{er} Janvier 2011 avec le LCPC pour former IFSTTAR

meilleur rendement sans contraintes liées à la vitesse du véhicule. A contrario, l'hybridation parallèle correspond à un véhicule thermique secondé par une machine électrique. Cette architecture assure un couplage direct entre le moteur thermique et les roues, s'affranchissant ainsi des pertes liées à la conversion électromécanique. Pour cette architecture, deux types d'organes de transmission sont considérés : une boîte de vitesse à 5 rapports (DSR – Discret speed ratio) identique à celle du véhicule conventionnel et un système de variation continue de vitesse (CSR – Continuous speed ratio). Enfin une hybridation combinée est étudiée. Elle est construite autour d'un train épicycloïdal et offre une variation continue du rapport de réduction entre le moteur thermique et les roues par la maîtrise du couple et de la vitesse d'une génératrice.

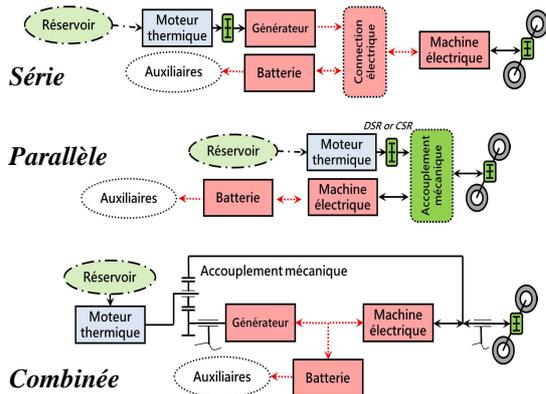


Fig. 1 : Différentes architectures de chaînes de traction hybrides étudiées

Pour effectuer une comparaison objective des différentes architectures d'hybridation, les mêmes organes de puissance sont considérés : un moteur thermique essence (1 litre – 3 cylindres - 50 kW) ainsi que des machines électriques synchrones à aimants permanents délivrant chacune une puissance maximale de 50kW. Ces organes sont caractérisés par leurs cartographies de rendement.

2.2. Commande optimale

Les chaînes de traction hybrides sont pilotées par un système de gestion énergétique dont le rôle est de répartir les appels instantanés de puissance entre la branche électrique et la branche thermique afin de diminuer la consommation du véhicule [9-15]. Dans une perspective de comparaison absolue entre les efficacités énergétiques potentielles des différents systèmes, il est nécessaire d'utiliser une méthode de contrôle optimal qui minimise la consommation globale du véhicule sur cycle donné.

Un cycle de conduite (INRETS ou autre) consiste en un profil de vitesse à la roue en fonction du temps. Pour réaliser ce profil de vitesse, le véhicule doit fournir une certaine puissance instantanée, à répartir entre le moteur thermique et la machine électrique de façon à minimiser la consommation en carburant du véhicule sur le cycle considéré. La variable de commande choisie ici est la puissance du moteur thermique, notée u , dont on déduit la puissance de la machine électrique. L'utilisation de la machine électrique modifie l'état de charge de la batterie qui

constitue donc une variable d'état du système, notée x (souvent notée SOC - state of charge).

La commande optimale $u^*(t)$ est déterminée en résolvant le problème d'optimisation suivant : minimiser la consommation en carburant $J(u)$ dans l'espace des commandes admissibles U , en respectant l'équation d'évolution du système et les contraintes sur l'état de charge de la batterie. En particulier, les consommations sont calculées à bilan batterie nul afin de comparer des systèmes dans des états énergétiques identiques. Ce problème est formalisé par le système d'équations (1).

$$\begin{cases} u^* = \operatorname{argmin}_{u \in U} J[u] \\ \dot{x} = f(u, x, t) \\ x(t_{initial}) = x(t_{final}) \end{cases} \quad (1)$$

Deux principes de calculs sont utilisés de manière classique dans la littérature : le principe du minimum de Pontryaguin (PMP) et la Programmation Dynamique de Bellman (DP).

Le premier s'appuie sur le Hamiltonien \mathcal{H} du problème, défini par l'équation (2), où $L(x, u, t)$ et λ sont respectivement la consommation instantanée en carburant et le multiplicateur de Lagrange associé à l'équation d'évolution du système. Ce paramètre représente le coût unitaire de la puissance électrique.

$$\mathcal{H}(x, u, \lambda, t) = L(x, u, t) + \lambda \cdot f(x, u, t) \quad (2)$$

Le principe du minimum de Pontryaguin stipule que si la loi de commande u^* est solution du problème (1), alors il existe une fonction $\lambda^*(t)$ solution de l'équation différentielle (3) :

$$\dot{\lambda}(t) = - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x}(x, u, \lambda, t) \quad (3)$$

et telle que :

$$\forall t \quad u^*(t) = \operatorname{argmin}_{u(t)} \mathcal{H}(x, u, \lambda^*, t) \quad (4)$$

La consommation du moteur thermique ne dépend pas de l'état de la batterie. De plus, pour le système étudié, l'amplitude de variation de l'état de charge de la batterie reste limitée, ce qui permet de négliger la variation des caractéristiques de celle-ci au cours du cycle. La fonction \mathcal{H} ne dépend alors pas de x , d'où un facteur λ constant au cours du temps. Le calcul de u^* et de λ^* est alors réalisé par une simple méthode de tir assurant le bilan batterie nul [14].

Le deuxième principe est issu des travaux de Bellman [5]. Il stipule que le problème d'optimisation global peut être décomposé en sous-problèmes plus simples à résoudre et s'énonce de la façon suivante [6] : « Dans un processus d'optimisation dynamique, une suite de commandes est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés sur la trajectoire qui lui est associée, les commandes ultérieures constituent une suite optimale de commandes pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales ». Ce principe conduit à la résolution d'une équation différentielle dite de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). Pour un état final x_f donné, on définit la fonction de coût « cost

to go » $V(y, \tau)$ comme étant le coût minimum pour passer de l'état courant $x(\tau) = y$ à l'état final $x(t_f) = x_f$. Soit par ailleurs $u^*(\tau)$, la commande optimale entre les instants τ et $\tau + d\tau$. D'après le principe d'optimalité :

$$V(y, \tau) = \min_{u(\tau)} \{ L(y, u, \tau). d\tau + V(y + f(y, u, \tau). d\tau, \tau + d\tau) \}. \quad (5)$$

et :

$$u^*(\tau) = \operatorname{argmin} V(y, \tau) \quad (6)$$

Le PMP conduit à une implantation numérique plus simple et à des calculs plus rapides que la programmation dynamique, ce qui a dans un premier temps favorisé cette méthode. En revanche, la programmation dynamique permet une intégration très naturelle de contraintes supplémentaires, en particulier sur l'état de charge de la batterie ($x_{min} \leq x \leq x_{max}$). Par ailleurs, l'augmentation des capacités de calcul et une programmation astucieuse permettent d'aboutir à des temps d'exécution de l'ordre d'une dizaine de secondes pour un cycle de 1000 points. C'est donc cette méthode qui a été retenue pour la suite de l'étude.

Notons toutefois qu'il existe une relation étroite entre le principe de Pontryaguin et l'équation de HJB : il a été montré [16, 17] que :

$$\lambda(t) = \frac{\partial V}{\partial x}(x, t) \quad (7)$$

A titre d'exemple, la Fig.2 montre les valeurs de λ moyen calculées à partir de la programmation dynamique pour une chaîne de traction parallèle DSR en fonction de la vitesse moyenne sur cycle INRETS. On constate que le coût de l'utilisation de la branche électrique est plus élevé sur cycle urbain lent, et relativement constant sur les autres cycles.

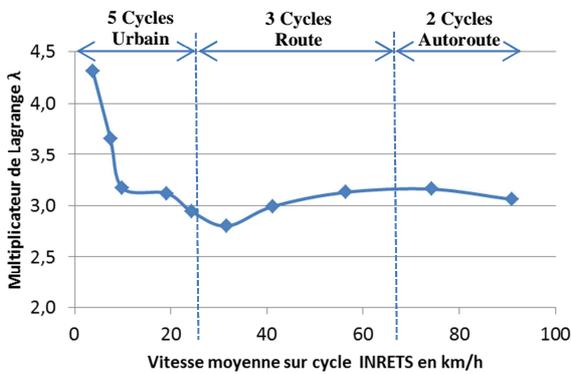


Fig. 2 : Estimation de la valeur du coût unitaire (λ) d'utilisation de la branche électrique en utilisant la Programmation Dynamique pour les différents cycles INRETS – Hybride parallèle DSR

3. DEFINITION D'UNE CHAINE DE TRACTION OPTIMALE

3.1. Comparaison des gains en émission de CO₂

Les consommations optimales des différents systèmes étudiés ont été calculées pour dix cycles représentatifs des usages clients (cycles INRETS). Une consommation de référence, correspondant à un véhicule thermique conventionnel, a également été calculée pour traduire l'économie de consommation en gain d'émission de CO₂. Les résultats sont présentés sur la Fig. 3, en fonction de la vitesse moyenne de chaque cycle.

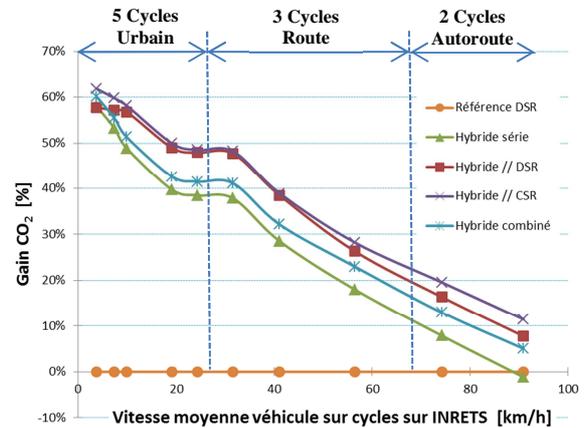


Fig. 3 : Gains en émission CO₂ pour les différentes chaînes de traction sur cycles INRETS

Les différentes courbes montrent une même tendance : plus la vitesse moyenne sur cycle est faible, et plus l'apport de l'hybridation est important. L'hybridation parallèle CSR et DSR apparaissent comme les plus performantes. L'hybridation combinée est pénalisée par le fait qu'une partie du flux énergétique transite à travers deux machines électriques pour réaliser un rapport de transmission variable. L'hybridation série est la moins performante, victime de son architecture qui induit un grand nombre de conversions énergétiques.

Ce classement des architectures conduit à focaliser la suite de l'analyse sur l'architecture parallèle. En particulier, la part du gain en CO₂ due à la récupération d'énergie au freinage est calculée (Fig. 4). Ces résultats montrent que l'essentiel des gains sur cycles urbains proviennent d'une meilleure utilisation du moteur thermique, alors qu'en cycle routier ils sont principalement dus à la récupération d'énergie au freinage. Sur cycle autoroutier, l'hybridation ne présente que peu d'intérêt car la charge moyenne du moteur thermique est telle qu'il fonctionne à ses meilleurs points de rendement sans recourir à la branche électrique et si les puissances de récupération d'énergie sont importantes, elles n'apparaissent sur ces cycles qu'avec une faible fréquence. Elles n'ont donc que peu d'impact sur les gains CO₂. Ces constats permettent de définir des critères d'optimisation du système suivant sa plage de fonctionnement : récupération de l'énergie au freinage pour les cycles urbains fluides et route ; optimisation du point de fonctionnement du moteur thermique sur cycles urbains lents.

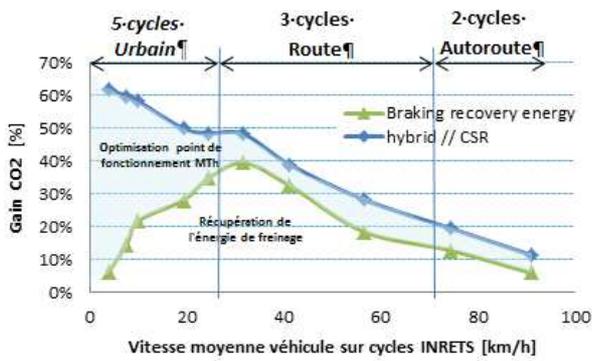


Fig. 4 : Part de la récupération d'énergie au freinage pour l'architecture hybride parallèle CSR

3.2. Les sollicitations des organes électriques

Les simulations fournissent également les points de fonctionnement des différents organes au cours du temps, ce qui permet d'observer les sollicitations du système. La Fig. 5 indique par un code couleur les différents modes de fonctionnement de la machine électrique relevés au cours du temps pour une chaîne de traction hybride DSR sur cycle d'homologation NEDC. Le vert correspond au mode « tout électrique », observé au démarrage du véhicule ou en fonctionnement à faible vitesse stabilisée ; le rouge représente le mode « récupération d'énergie », en phases de freinage. En fonctionnement hybride, la machine électrique permet de déplacer le point de fonctionnement du moteur thermique vers une zone de meilleur rendement. On distingue alors le mode « boost » (couleur noir) lorsque le moteur thermique fournit une puissance inférieure à la puissance demandée, et le complément est produit par la machine électrique et le mode « recharge de la batterie » (couleur magenta) lorsque le moteur thermique fournit une puissance supérieure à la puissance demandée et le complément est récupéré par la machine électrique.

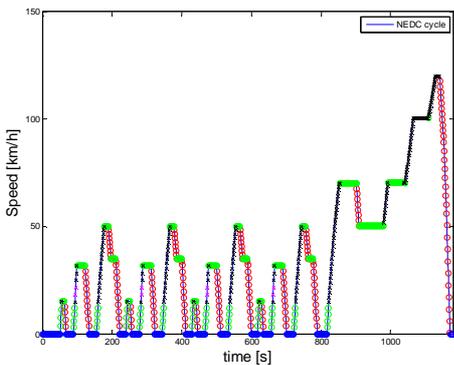


Fig. 5 : Mode de fonctionnement d'une chaîne de traction hybride parallèle DSR sur cycle NEDC - ● Mode pur électrique en traction ● Mode générateur électrique + thermique ● Mode boost électrique + thermique ● Mode récupération d'énergie au freinage ● Arrêt du véhicule

La Fig. 6 reprend ces points de fonctionnement pour l'ensemble des cycles INRETS et les positionne dans le plan (couple / vitesse) de la machine électrique.

L'ensemble de ces informations contribue à la définition de spécifications techniques pour atteindre une conception de chaîne de traction optimale.

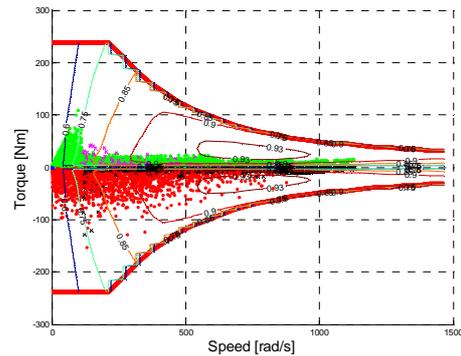


Fig. 6 : Sollicitations de la machine électrique pour un hybride parallèle DSR sur l'ensemble des cycles INRETS

La connaissance des sollicitations organiques permet également d'identifier la capacité de batterie nécessaire pour atteindre le minimum de consommation de la chaîne de traction sur un cycle donné (Fig. 7). Cette capacité minimale est directement liée aux besoins de récupération de l'énergie cinétique du véhicule lors des phases de freinage. Elle est d'autant plus grande que la vitesse moyenne (ou la vitesse maximale) du cycle est importante.

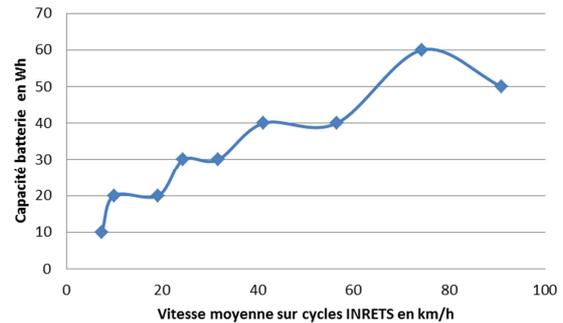


Fig. 7 : Capacité minimale de batterie nécessaire pour atteindre la consommation minimale sur cycle donné, tracée en fonction de la vitesse moyenne du véhicule sur cycles INRETS.

3.3. Formalisation d'une architecture optimale

3.3.1. Principes d'idéalité

L'exploitation de l'ensemble des résultats permet d'identifier des principes d'idéalité [18, 19] qui orientent la définition d'une architecture optimale. A titre d'exemple, le tableau 1 énonce certains principes en fonction des besoins en puissance instantanée à la roue. P_{MTH_opti} est la puissance du moteur thermique pour laquelle le rendement est maximum.

Les architectures étudiées qui convergent vers cet idéal sont identifiées. L'analyse des sollicitations des organes électriques pour les différents modes de fonctionnement permet d'orienter la conception vers une solution optimale en émission CO_2 .

En mode Traction du véhicule ($P_{roue} > 0$), il est intéressant d'analyser plus en détail les principes d'idéalité en fonction de la phase de fonctionnement du véhicule :

Tableau 1. Principes d'idéalité d'une chaîne de traction optimale

	Traction ($P_{roue} > 0$)		Vehicule arrêté et mode «coasting» ($P_{roue} = 0$)	Récupération d'énergie au freinage ($P_{roue} < 0$)
Principes d'idéalité	Lorsque P_{roue} est proche de la P_{MTh_opt} , le MTh doit être couplé directement aux roues, sans recourir à l'énergie électrique.	Sinon, l'énergie électrique est utilisée pour optimiser le point de fonctionnement du MTh et le rendement global de la CdT	Le MTh et la machine électrique sont arrêtés. La batterie est utilisée pour alimenter les auxiliaires (assistances de direction, de freinage, ...).	Le MTh est arrêté. La machine électrique doit être directement reliée aux roues.
Solutions d'architectures potentielles	Parallèle CSR et DSR	Parallèle CSR et DSR Combinée Série	Parallèle CSR et DSR Combinée Série	Parallèle CSR Parallèle DSR Combinée Série

- Au démarrage :

- Le démarrage en pur électrique ou en hybridation série permet de s'affranchir de la contrainte de vitesse de ralenti du moteur thermique et du recours à un embrayage pour l'hybridation DSR. Ces modes de fonctionnement permettent d'éviter de faire fonctionner le moteur thermique à de très mauvais rendements.
- Disposer d'une variation continue de vitesse (CSR) permet d'optimiser le point de fonctionnement du moteur thermique même à faible vitesse du véhicule et de limiter ainsi le recours à la branche électrique.

- En phase d'accélération et de vitesse constante:

- Un couplage mécanique direct du moteur thermique aux roues est recommandé. Il permet de limiter les étages de conversion d'énergie, et donc d'améliorer le rendement global de la chaîne de traction.
- Le point de fonctionnement du moteur thermique peut être optimisé soit en jouant sur l'adaptation de la vitesse de rotation du moteur thermique (effet CSR ou sélection des meilleurs rapports de vitesses), soit en exploitant la branche électrique, mais avec un usage à limiter du fait des pertes électriques.

3.3.2. Définition de l'architecture optimale

L'hybridation série n'offre pas de solution technologique performante car la totalité de l'énergie produite par le moteur thermique transite par la branche électrique et est soumise aux pertes du générateur et de la machine de traction. Elle présente toutefois un intérêt pour assurer les phases de démarrage

A contrario, l'hybridation parallèle (DSR ou CSR) assure un couplage direct entre le moteur thermique et les roues, limitant ainsi les étages de rendement. Pour optimiser le point de fonctionnement du moteur thermique, la branche électrique est sollicitée au plus juste. Pour assurer les phases de démarrage, l'architecture parallèle DSR recourt au fonctionnement pur électrique. Dans le cas où l'énergie stockée dans la batterie est insuffisante au démarrage, cette architecture nécessite un organe auxiliaire tel qu'un embrayage pour lever la contradiction sur la compatibilité des vitesses de rotation roue / moteur thermique.

L'hybridation CSR lève aussi cette contradiction dans les phases de démarrage. Elle apparait comme une solution

potentiellement idéale, mais sa performance est conditionnée par la faisabilité d'une variation continue du rapport de transmission avec une ouverture (plage de rapport de transmission) importante et un très haut rendement.

L'hybridation combinée qui met en œuvre la variation continue de vitesse en s'appuyant sur un train épicycloïdal et une génératrice a une performance en retrait par rapport à l'hybridation CSR et DSR, conséquence du recours permanent à la branche électrique pour adapter la vitesse du moteur thermique à la vitesse des roues.

Pour les phases de récupération d'énergie au freinage, les systèmes étudiés convergent tous vers un idéal avec un couplage mécanique direct entre les roues et la machine électrique. Pour l'hybridation parallèle DSR, converger vers l'idéalité sous-entend de pouvoir découpler les roues du moteur thermique pour s'affranchir de pertes par frottement et par pompage du moteur thermique, sans complexifier le système.

En conclusion, cette analyse montre l'intérêt de poursuivre l'étude sur une hybridation parallèle. Les technologies de variateurs de vitesse (CSR) actuellement disponibles sur le marché étant particulièrement énergivores, l'attention sera focalisée sur un hybride parallèle intégrant une boîte de vitesse à rapports discrets (DSR), avec un coût énergétique des changements de rapport à optimiser. Le choix de l'architecture étant justifié, on se propose maintenant d'identifier les spécifications d'une machine électrique idéale répondant aux sollicitations calculées par Programmation Dynamique.

3.3.3. Spécifications techniques de la machine électrique

En se basant sur les conclusions issues de l'analyse de la Fig. 4, il est possible de définir les points de fonctionnement de la machine électrique pour lesquels le rendement doit être optimisé. Vis-à-vis de l'optimisation du point de fonctionnement du moteur thermique, les spécifications de la machine électrique sont principalement issues des cycles urbains, alors que pour la récupération d'énergie au freinage, les cycles routiers, et en particulier le cycle INRETS R1, sont déterminants. La Fig. 8 montre la distribution en énergie des points de sollicitation de la machine électrique en mode moteur pour les cycles urbains (a), et en mode générateur pour le cycle routier R1 (b). Ces données préfigurent la cartographie de rendement idéale de la machine électrique. Les zones rouges correspondent à celles où les rendements sont à maximiser.

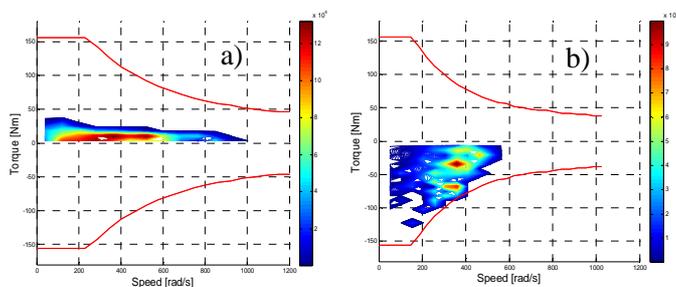


Fig. 8 : Distribution énergétique associées à la sollicitation de la machine électrique. a. mode moteur sur les différents cycles INRETS urbains - b. mode générateur pour le cycle INRETS routier R1.

4. CONCLUSIONS

L'originalité de ce travail est de réaliser une étude comparative de différentes architectures de chaînes de traction hybrides existantes (série, parallèle et combinée) pour identifier les spécifications d'une architecture optimale en émission de CO₂ adaptée à un type de véhicule donné (segment B).

Pour comparer objectivement ces différentes architectures, une stratégie de contrôle-commande optimale, basée sur le minimum de consommation atteignable, a été développée. La facilité d'intégration des contraintes et la compatibilité des temps de calculs ont conduit à adopter la Programmation Dynamique, sur laquelle repose l'intégralité des résultats présentés dans cet article.

Ces résultats montrent les limites de l'hybridation série pour réaliser une chaîne de traction hybride pour véhicule HEV, excepté pour les roulages urbains lents. L'hybridation combinée est plus performante, mais son potentiel est fortement conditionné par l'efficacité de la génératrice qui assure la variation continue du rapport de transmission.

Le choix d'architecture optimale s'est donc porté sur l'hybridation parallèle. Les systèmes de variation continu du rapport de transmission (CSR) présents sur le marché étant particulièrement énergivores, l'étude s'oriente sur une boîte de vitesse à rapports discrets (DSR), solution qui à priori offre une opportunité de changement de rapport à faible coût énergétique.

L'observation des sollicitations calculées par Programmation Dynamique en fonction des usages clients a permis d'identifier les points de fonctionnement pour lesquels les organes électriques doivent être optimisés. Ces spécifications techniques permettent d'orienter la conception de la machine électrique pour concevoir une chaîne de traction très efficiente.

5. REFERENCES

- [1] « Industries automobiles facteurs structurels d'évolution de la demande » – Rapport PIPAME du ministère de l'économie des finances et de l'industrie – Mars 2011 - <http://www.industrie.gouv.fr/p3e/etudes/automobile-demande/automobile-demande.php>.
- [2] « New Hybrid Reviews, News & Hybrid Mileage (MPG) Info | Hybrid Cars ». [En ligne]. Available on: <http://www.hybridcars.com/>. [Consulté le: 28-mars-2014].
- [3] J. Crauser, M. Maurin, and R. Joumard, Representative Kinematic Sequences for the Road Traffic in France, SAE Technical Paper 890875, 1989, doi:10.4271/890875.
- [4] R. Joumard, M. André, R. Vidon, P. Tassel, C. Pruvost, Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières, Rapport n° LTE 9902 de Décembre 1999.
- [5] R.E Bellman, Dynamic programming, Princeton University Press, 1957.
- [6] JC Culioli, Introduction à l'optimisation, [Ouvrage]. - Ellipse, 2012.
- [7] L. Guzzella, A. Sciarretta, Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization, 2nd ed., Springer, 2007.
- [8] F. Roy, A. M. Catania, F. Ossart, C. Marchand, Hybrid powertrain design using optimal control strategies, EVS27, November 17-20, 2013, Spain.
- [9] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, et G. Rizzoni, « Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles », *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 5, n° 1, p. 58–72, 2000.
- [10] Chan-Chiao Lin, Hwei Peng, J. W. Grizzle, et Jun-Mo Kang, « Power management strategy for a parallel hybrid electric truck », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, n° 6, p. 839–849, nov. 2003.
- [11] S. Delprat, J. Lauber, T. M. Guerra, et J. Rimaux, « Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, n° 3, p. 872–881, mai 2004.
- [12] A. Sciarretta, M. Back, et L. Guzzella, « Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, n° 3, p. 352–363, mai 2004.
- [13] A. Sciarretta et L. Guzzella, « Control of hybrid electric vehicles », *Control systems, IEEE*, vol. 27, n° 2, p. 60–70, 2007.
- [14] G. Rousseau, D. Sinoquet, et P. Rouchon, « Constrained Optimization of Energy Management for a Mild-Hybrid Vehicle », *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP*, vol. 62, n° 4, p. 623–634, juill. 2007.
- [15] Namwook Kim, Sukwon Cha, et Hwei Peng, « Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, n° 5, p. 1279–1287, sept. 2011.
- [16] L. Serrao, S. Onori, et G. Rizzoni, « A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles », *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 133, n° 3, p. 031012, 2011.
- [17] F. H. Clarke, R. B. Vinter, « The relationship between the maximum principle and dynamic programming », *SIAM Journal of Control and Optimization*, Vol 25, N°5, September 1987.
- [18] Savransky S. D. Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving [Ouvrage]. - CRC Press, 2000.
- [19] F. Roy, C. Gazo, F. Ossart, C. Marchand, TRIZ methodology adapted to hybrid powertrains performances evaluation, Colloque TRIZ Future 2013, Octobre 2013, Paris.