

Modélisation et gestion de la thermique globale d'un véhicule en vue de réduire sa consommation

Jacques MARACHLIAN², Riad BENELMIR¹, Cédric ROUAUD²

1. LEMTA-CNRS UMR 7563 – UHP Nancy I
2 Rue Jean Lamour, 54519 Vandoeuvre-Les-Nancy

2. RENAULT
1 Avenue du Golf, 78288 Guyancourt

jmarachlian@yahoo.com, benelmir@esstin.uhp-nancy.fr, cedric.rouaud@renault.com

Résumé - L'objectif des travaux présentés concerne la réduction de la consommation d'un véhicule par une approche d'optimisation globale de la thermique. Trois critères d'optimisation basés sur les études exergetique et thermoéconomique ont été mis en œuvre. Un modèle numérique regroupant, sous le même environnement de simulation, les modèles de la chaîne cinématique, du circuit hydraulique de refroidissement et de la thermique du moteur a été développé pour reconstituer l'ensemble des interactions énergétiques entre ces systèmes en régime dynamique. L'outil de simulation final est de niveau technologique modulaire qui se base sur le formalisme bond graph. Il intègre aussi les critères d'optimisation et permet d'évaluer différentes solutions de réduction de la consommation.

1 Introduction

Sous les fortes contraintes simultanées de la préservation de l'environnement et de la concurrence, les constructeurs automobiles sont amenés à améliorer les prestations des véhicules en termes de confort, de sécurité et de plaisir de conduite tout en réduisant la consommation de carburant et par conséquent les émissions polluantes. La réduction de la consommation passe inévitablement par deux actions. La première est l'optimisation du rendement global du système défini par le rapport entre les prestations du système et sa consommation. La deuxième est la réduction de la prestation énergétique demandée au système (par exemple : meilleure isolation thermique de l'habitacle). Les travaux présentés dans ce document s'inscrivent dans le cadre de la première action.

2 L'outil de simulation

Afin de pouvoir comparer les solutions possibles de gestion de la thermique globale, un outil de simulation numérique regroupant les systèmes énergétiques d'un véhicule a été créé et des critères d'évaluation y ont été intégrés. La modélisation s'est portée sur la chaîne cinématique, le circuit hydraulique de refroidissement et la thermique du moteur qu'on présentera plus bas. L'outil permet la simulation en régime dynamique. Son entrée est le cycle de roulage imposé au véhicule. Ses sorties (fig. 1) permettront de calculer des critères de comparaison qu'on présente dans la partie suivante.

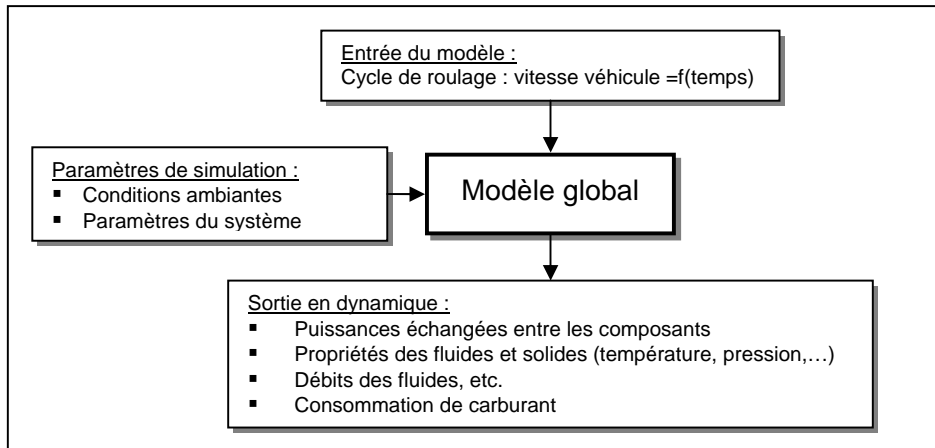


Figure 1 – Les entrées et sorties du modèle global.

L’aspect modulaire de l’outil a été possible par l’adoption du formalisme bond graph [1]. Les objectifs assurant la pérennité de l’outil ont été largement atteints sous l’environnement de simulation Amesim [2]. Le développement de l’outil de simulation a suivi une procédure en V (figure 2). En descendant le V, des modules de simulation (composants technologiques) sont définis suivant les composants physiques à modéliser. La structure interne de ces modules de simulation est construite à l’aide d’un langage de niveau comportemental qui garantit les principes de conservation ainsi que la communication (entrées/sorties des modèles) entre les modules. A ce niveau, le formalisme bond graph est utilisé. Finalement, les équations mathématiques sont déduites, à partir des bond graphs, et implémentées dans le langage de programmation. A ce stade, on se trouve au niveau le plus bas qui est le niveau algorithmique. En remontant le V, on valide le composant ou le sous-système en entier. La dernière étape est l’assemblage des sous-systèmes pour aboutir au modèle global.

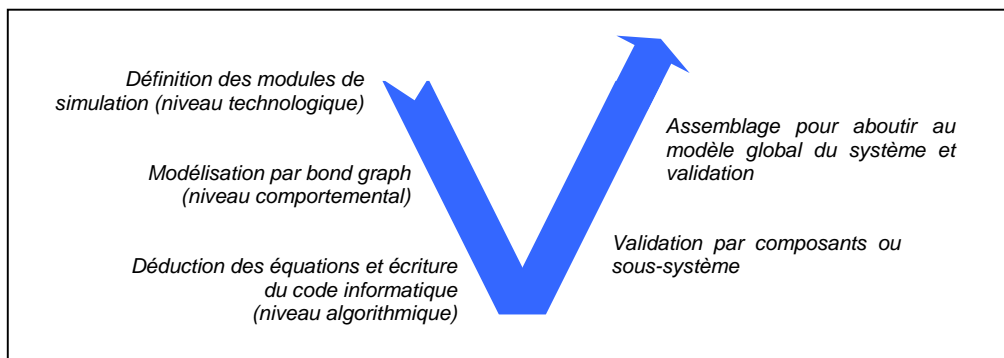


Figure 2 – Procédure en V de développement des modèles.

La chaîne cinématique comprend le comportement dynamique du moteur, l’embrayage, la boîte de vitesses, le pont (différentiel), les roues et la masse du véhicule. La modélisation de ce sous-système est nécessaire pour le calcul du point de fonctionnement du moteur (couple et régime) pour un cycle de roulage donné ainsi que pour l’évaluation des pertes d’énergie de chaque composant. Le modèle permet ainsi de prendre en compte l’impact de l’ajout ou du pilotage d’un accessoire sur le point de

fonctionnement du moteur. L'estimation de la consommation est donnée en fonction de la chaleur dégagée par la combustion déduite d'un bilan énergétique effectué sur le moteur. Le modèle de circuit hydraulique de refroidissement (figure 3) permet de retrouver le débit et les propriétés du fluide (température, pression) en tout point du circuit. Le modèle se base sur des éléments en pseudo bondgraph [1].

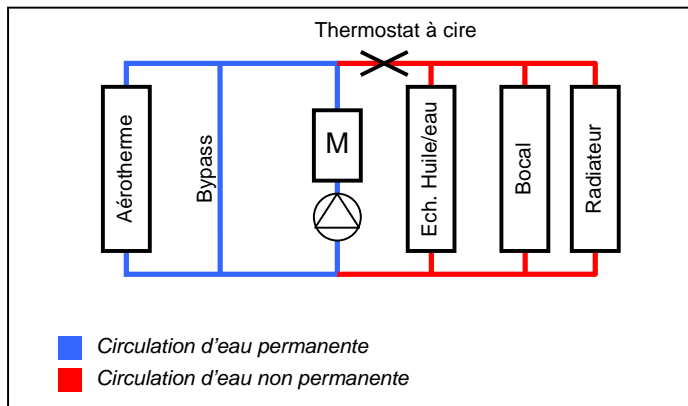


Figure 3 – Le circuit hydraulique. (aérotherme : échangeur air/eau pour le chauffage de l’habitacle)

La validation des débits en régime permanent est basée sur des essais à différents régimes du moteur avec le thermostat fermé et complètement ouvert. Les écarts entre simulation et mesures sont en moyennes de 2,5% avec une erreur maximale de 4% observée pour l’aérotherme. Le modèle thermique du moteur a pour but de simuler l’évolution des températures des pièces métalliques, de l’eau et de l’huile du moteur. Basé sur la méthode nodale, il a été développé en interne chez Renault par Jarrier [3]. La description du moteur comporte un total de 57 nœuds, dont 33 nœuds dans la matière, 3 nœuds dans le circuit d'eau, 17 nœuds dans le circuit d'huile, 3 nœuds dans les gaz et un nœud pour l’air externe. La représentation de la source de chaleur par combustion utilise le coefficient d’échange gaz-paroi de Woschni [4] basé sur une pression cylindre donnée par mesures sur banc moteur. La figure 4 compare les calculs aux mesures sur le cycle de roulage NEDC.

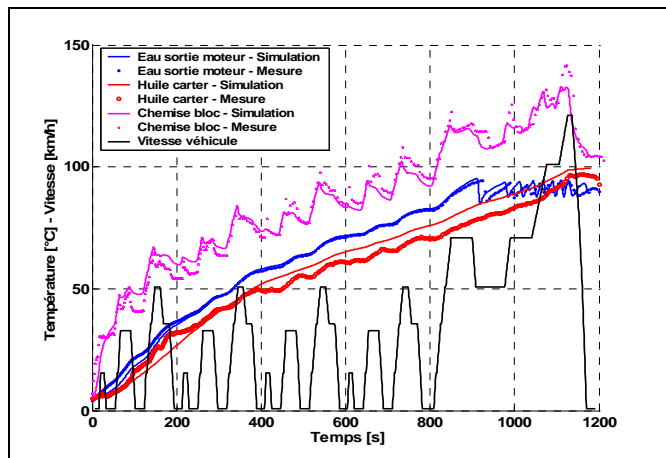


Figure 4 – Comparaison calculs/mesures sur un cycle NEDC.

3 Les critères d'optimisation

Les critères d'optimisation adoptés se basent sur les études exergetique et thermoéconomique. La première permet d'évaluer et de diagnostiquer le degré d'imperfection d'un système. La seconde ajoute à l'étude exergetique une couche de critère supplémentaire de type monétaire. Le concept d'énergie sert à la conception et au dimensionnement du système d'un point de vue respect des cahiers des charges de température, de pression, de débits... Par contre, la performance du rendement d'un système ne peut être complètement expliquée uniquement par la notion d'énergie. Seule l'utilisation combinée des premier et deuxième principes de la thermodynamique, c'est-à-dire de la notion d'exergie, permettrait d'expliquer les causes d'une dégradation éventuelle de performance. Lorsque la performance du système est évaluée en dynamique, l'expression suivante du rendement exergetique est adoptée :

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_f + Ex_{acc}^+}{Ex_r + |Ex_{acc}^-|} = \frac{1 - Ex_d}{Ex_r + |Ex_{acc}^-|} \quad (5)$$

Avec Ex_f l'exergie utile fournie par le système, Ex_r l'exergie reçue par le système, Ex_{acc}^+ l'exergie accumulée dans le système et Ex_{acc}^- l'exergie restituée par le système. Ces termes sont le résultat d'intégration dans le temps de leurs termes de puissances respectifs. Le rendement défini par l'expression (5) est dénommé « rendement exergetique cumulé ». Dans le cas d'utilisation des termes de puissances, on parle de « rendement instantané ». La figure 5 illustre les termes de la définition du rendement exergetique cumulé. Il est à noter que la maximisation du rendement d'une machine revient à minimiser ses pertes exergetiques. Dans le cas du véhicule conventionnel, l'exergie est le plus souvent accumulée sous forme thermique. Le sort de la partie accumulée n'est pas connu préalablement à un instant donné. Les définitions du rendement avec et sans le terme d'accumulation au numérateur constituent respectivement les limites supérieure et inférieure du rendement final. Ce dernier dépend du niveau d'utilisation de l'exergie accumulée. Si elle a été entièrement utile, le rendement final correspondrait au rendement avec le terme d'accumulation. C'est le scénario le plus favorable. Au contraire, si aucun profit n'a été pris de l'exergie accumulée le rendement final correspondrait au rendement sans le terme d'accumulation. C'est le cas lorsque le client quitte sa voiture pour ne la reprendre qu'après refroidissement total des masses chaudes.

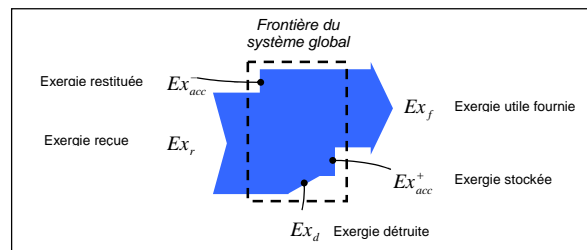


Figure 5 – Les termes définissant le rendement exergetique global.

Dans l'étude présente, la frontière du système global qui sert à établir son rendement exergetique est choisie de sorte à englober toutes les destructions d'exergie au sein du système ainsi que dans son environnement. La température au niveau de la frontière est donc celle de l'ambiance. Cette frontière enveloppe le véhicule dans sa globalité avec ses gaz d'échappement ramenés à la température ambiante (figure 6). Les prestations du véhicule considérées par les termes au numérateur du rendement sont le déplacement du véhicule (énergie mécanique de déplacement) et le confort thermique en mode chauffage (exergie de l'air chaud fournie à l'habitacle). Aussi, l'unique échange exergetique avec l'environnement est l'apport exergetique du carburant qui apparaît au dénominateur de l'expression du rendement.

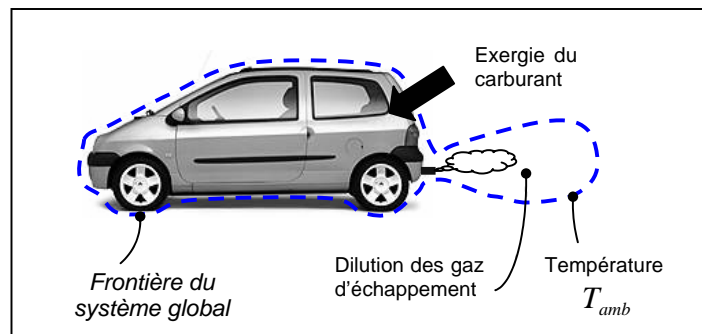


Figure 6 – Volume de contrôle du système servant à la définition du rendement exergetique.

Le second critère adopté est le nombre d'irréversibilité qui représente la contribution d'un composant (ou d'un groupe de composants) à la destruction d'exergie totale du système pris dans sa globalité. Il permet ainsi de repérer les éléments sièges des plus fortes pertes exergetiques. Dans le processus d'amélioration du rendement exergetique du système, une attention particulière devrait être portée aux composants qui présentent des nombres d'irréversibilité élevés.

4 Application

L'exploitation de l'outil de simulation est illustrée par la comparaison des trois cas suivants : (1) le véhicule dans sa configuration de base (cas de référence) ; (2) le véhicule dans sa configuration de base avec la fonction chauffage de l'habitacle ; (3) le véhicule dans sa configuration de base avec un thermostat piloté. La figure 7 compare les limites supérieures et inférieures des rendements exergetiques cumulés à la fin du deuxième cycle NEDC. Les nombres d'irréversibilité par organe sont présentés à la figure 8.

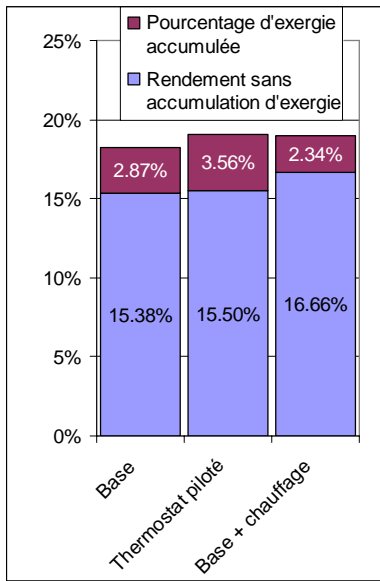


Figure 7 – Rendement exergetique cumulé.

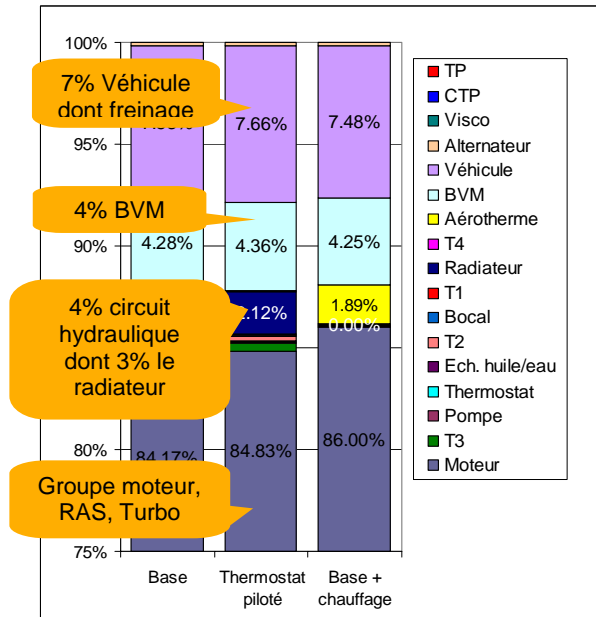


Figure 8 – Nombres d'irréversibilité des organes.

5 Conclusion

Trois critères d'optimisation basés sur les études exergetique et thermoéconomique [5] ont été mis en œuvre pour optimiser globalement la performance d'un véhicule en vue de réduire sa consommation. Un modèle numérique regroupant, sous le même environnement de simulation, les modèles de la chaîne cinématique, du circuit hydraulique de refroidissement et de la thermique du moteur a été développé pour reconstituer l'ensemble des interactions énergétiques entre ces systèmes. Il intègre aussi directement les critères d'optimisation. La simulation menée en dynamique a permis d'évaluer la performance de différentes solutions de gestion thermique avec et sans chauffage de l'habitacle suivant leur rendement exergetique cumulé. Pour chaque solution, la contribution des différents organes à l'imperfection du système a été mise en évidence à travers les nombres d'irréversibilité.

Références bibliographiques

- [1] DAUPHIN-TANGUY G. et al. *Les bond graphs*. Paris : Hermès, 2000, 383p.
- [2] AMESIM. *Advanced Modeling Environment for Simulations*. www.amesim.com
- [3] JARRIER Laurent. *Comportement thermique transitoire après démarrage à froid, des moteurs à combustion interne : étude expérimentale et simulation*. Thèse mécanique énergétique. Versailles: Université de Versailles, 1999, 254p.
- [4] WOSCHNI G. *A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine*. SAE 670931, 1967.
- [5] BENELMIR Riad. *Second law analysis of a cogeneration cycle*. Thèse en génie mécanique. Etats-Unis: Georgia Institute of Technology, 1989, 320p.