

Gestion optimale de la thermique du véhicule

Riad BENELMIR, Jacques MARACHLIAN

Université Henri Poincaré, Faculté des Sciences et Technologies-LERMAB, Campus Victor Grignard, bd. Aiguillettes 54506 Vandoeuvre-Les-Nancy, France

e-mail : benelmir@lermab.uhp-nancy.fr, phone : +33679604134.

Abstract

Sous les fortes contraintes simultanées de la préservation de l'environnement et de la concurrence, les constructeurs automobiles sont amenés à améliorer le rendement global de leurs véhicules de sorte que ceux-ci fournissent le maximum de prestation pour la consommation la plus faible possible diminuant ainsi les émissions polluantes. Les émissions de CO₂ sont, elles, proportionnelles à la consommation de carburant. Pour l'optimisation du rendement global, différentes solutions sont possibles dont la gestion de la thermique globale qui vise une optimisation globale plutôt que locale. L'objectif de ce travail est de créer un outil de simulation des systèmes thermiques d'un véhicule et d'y intégrer des critères d'évaluation afin de pouvoir comparer les solutions de gestion de la thermique. Cet outil doit reconstituer les interactions entre l'ensemble de ces systèmes thermiques en regroupant leurs modèles sous le même environnement de simulation. Les moyens d'action par la gestion thermique sont présentés ainsi que les critères d'évaluation adoptés.

Mot clés : HVAC automobile, analyse exergétique

EVOLUTION DES EMISSIONS de CO₂

Les quantités actuelles de gaz à effet de serre rejetées et l'évolution de certains secteurs économiques n'annoncent pas une stabilisation des émissions et encore moins une baisse de celles-ci si aucune mesure supplémentaire n'est prise pour les réduire. Parmi les six substances impliquées dans le phénomène d'accroissement de l'effet de serre en 2000, le CO₂ est celui qui y contribue le plus massivement: 69% de la contribution au PRG (Potentiel de Réchauffement Global). Parmi les secteurs d'activité, le transport routier est devenu le plus important émetteur de CO₂ (26% en 2004). Même si en 2002, près d'une voiture sur dix vendues en France émet au maximum 120 g de CO₂/km, les émissions de CO₂ des véhicules vendus en France ont baissé de 1 gramme en 2005 par rapport à 2004, atteignant une valeur de 152 gCO₂/km. Si les émissions des voitures Diesel stagnent à 149 gCO₂/km, celles des véhicules essence ont par contre baissé de 3 grammes (de 162 gCO₂/km en 2004 à 159 gCO₂/km en 2005). Il semble que les objectifs de l'ACEA [1] **Error! Reference source not found.** de 140 g de CO₂/km de 2008 (l'équivalent de 5,3L/100km pour un Diesel) et 120 g de CO₂/km en 2012 (l'équivalent de 4,5L/100km pour un Diesel) ne soient pas facilement atteignables. Face à la gravité croissante du problème, l'Europe et le Japon, et plus récemment les Etats-Unis, témoignent d'une réelle volonté de réduire la consommation énergétique des véhicules et par là même les émissions de CO₂ qui sont directement proportionnelles à la consommation de carburant (1L/100km Diesel = 26,48 g CO₂/km). Ainsi en Europe, les réglementations concernant les émissions polluantes se durcissent.

L'amélioration continue des prestations, poussée par la concurrence et la confirmation de l'identité de marque, d'un côté, et l'inévitable respect de l'environnement, d'un autre, sont des soucis partagés des constructeurs d'automobiles d'aujourd'hui. D'une part, la sécurité, la réduction des émissions par systèmes actifs, la nuisance sonore, la qualité et le confort sont des objectifs qui ne font qu'augmenter la consommation en carburant. D'autre part, les actions telles que l'allègement du véhicule, l'amélioration de l'aérodynamique, l'amélioration du rendement des moteurs et des pneumatiques réduisent cette consommation. En effet, la réduction de la consommation nette n'est possible qu'avec l'action d'une forte contrebalance (figure 1). Depuis 1984, la masse des véhicules ne cesse de croître. Cela est dû, en partie, au renforcement de la sécurité et à la multiplication des équipements de confort (vitres électriques, climatisation) qui contrebalancent la perte de poids liée à l'allègement des matériaux. La puissance massique (égale à la puissance maximale * 1000 / masse du véhicule) est en forte hausse depuis 1995 (+10%), ce qui signifie que l'augmentation de la puissance des véhicules est supérieure à la hausse de la masse des véhicules [2].

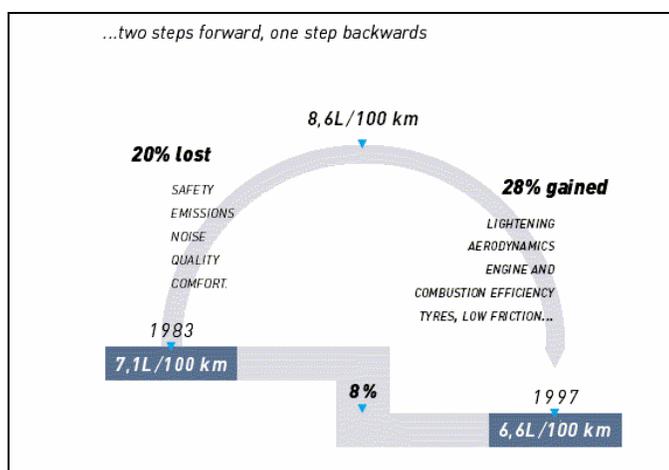


Fig. 1. La réduction de la consommation se fait en contrebalançant fortement l'augmentation de la consommation.

En outre, les mesures de sécurité ne sont que source d'augmentation de la consommation. Par exemple pour une motorisation Diesel, l'allumage des feux de croisement de jour nécessite, sur le cycle d'homologation NEDC, une consommation électrique permanente de 150W qui induit une surconsommation de 0,15L/100km. Le niveau de surconsommation lié à l'utilisation seule de la climatisation automobile est très variable. Il peut atteindre plus de 16% de la consommation de base du véhicule sur cycle NEDC [3] et 7% de la consommation annuelle [4] en fonction du type de motorisation et de la puissance du véhicule. Ces contraintes s'appliquent évidemment à Renault aussi qui en plus de son objectif d'alignement sur les cibles de l'ACEA de réduction des émissions de CO₂, s'engage à donner l'exemple au niveau de la sécurité. Ces différents objectifs sont généralement antagonistes et le choix des compromis s'avère un exercice difficile.

EFFET DE LA THERMIQUE SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT

L'amélioration de l'efficacité des moteurs, la création de nouveaux carburants et systèmes de propulsion, les aérodynamismes améliorés et matériaux légers comptent parmi les évolutions technologiques qui réduiront la consommation. Cependant, la surconsommation provient aussi des démarrages à froid. Sur un cycle d'homologation NEDC (voir annexe A), les écarts de

consommation sont de 10% à 15% entre un départ à froid à 20°C et un départ à chaud à 90°C. En effet, cette surconsommation provient en majeure partie des pertes mécaniques par frottement. Celles-ci dépendent de la température de l'huile de lubrification qui conditionne sa viscosité. L'atteinte d'une température optimale dans les plus courts délais est donc souhaitée. Parallèlement, la puissance de chauffage de l'habitacle empruntée à l'eau ralentit sa montée en température ce qui va dans le sens contraire. Ainsi, dans les réglementations de mesure de consommation, on voit une tendance générale à instaurer des cycles de roulage qui prennent en compte le démarrage à froid et les fonctions auxiliaires des véhicules automobiles qu'elles soient nécessaires au roulage, à la sécurité ou même au confort qui perd de plus en plus de son caractère optionnel. C'est le cas, aux Etats-Unis, du cycle SC03 qui fait partie du Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) révisé en 1996. Différents travaux ont montré que la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation est possible par une meilleure gestion de la thermique globale. A titre d'exemple, d'après l'étude expérimentale menée par Geels et al. [5] (projet THEMIS de Valéo), l'introduction de composants mécatroniques (pompe à eau électrique, vanne multi-voies électrique, ventilateur de radiateur à vitesse pilotable) permet, par un meilleur contrôle, d'optimiser le refroidissement du moteur et de réduire de 4% la consommation sur le cycle d'homologation (NEDC). La gestion de la thermique globale et ses objectifs sont définis dans la partie qui suit.

GESSTION DE LA THERMIQUE GLOBALE

L'objectif de la gestion de la thermique globale est de réguler efficacement l'énergie nécessaire dans le véhicule et de l'utiliser de manière à ce qu'il en résulte :

- Un minimum d'émissions polluantes
- Une faible consommation de carburant
- Une sécurité élevée de fonctionnement
- Un maximum de confort pour les passagers du véhicule

En d'autres termes, la gestion thermique, c'est la régulation intelligente des flux d'énergie en fonction des besoins dans le véhicule. La gestion de la thermique globale d'un véhicule moderne doit coordonner la contribution de tous les organes du système de refroidissement moteur, des organes du système d'échappement, du compartiment passagers ainsi que la dissipation de chaleur sous le capot sous deux conditions de fonctionnement principales. La première est le fonctionnement à froid pendant laquelle la gestion de la thermique doit, d'une part, amener en un minimum de temps le groupe motopropulseur (moteur et boîte de vitesses) à sa température de fonctionnement optimale pour réduire les frottements source de surconsommation et d'émissions néfastes. D'autre part, elle doit garantir assez de calories pour réchauffer l'habitacle aussi rapidement que possible dans le cas de climat froid, ainsi que pour dégivrer et désembuer le pare-brise dont la condition affecte la visibilité et donc la sécurité. En outre, le même objectif de montée en température est valable pour le catalyseur qui doit atteindre sa température d'amorçage dans les plus courts délais suivant le démarrage. La deuxième condition de fonctionnement est celle du moteur à chaud. A ce stade, la gestion de la thermique doit assurer le bon refroidissement de tous les organes sous toutes les conditions de roulage ce qui garantit, en plus, une durée de vie maximale pour les pièces et les fluides. Les températures optimales doivent être maintenues pour réduire les pertes par frottements, notamment pour l'huile du moteur, alors que les températures limites ne doivent pas être dépassées sous toutes conditions extrêmes. Parallèlement, le maintien du confort dans l'habitacle en climat chaud ou encore froid doit être assuré et ceci même lors d'un arrêt temporaire. La figure 2 présente de façon stylisée l'évolution de la température du moteur et l'action recherchée par la gestion de la thermique globale.

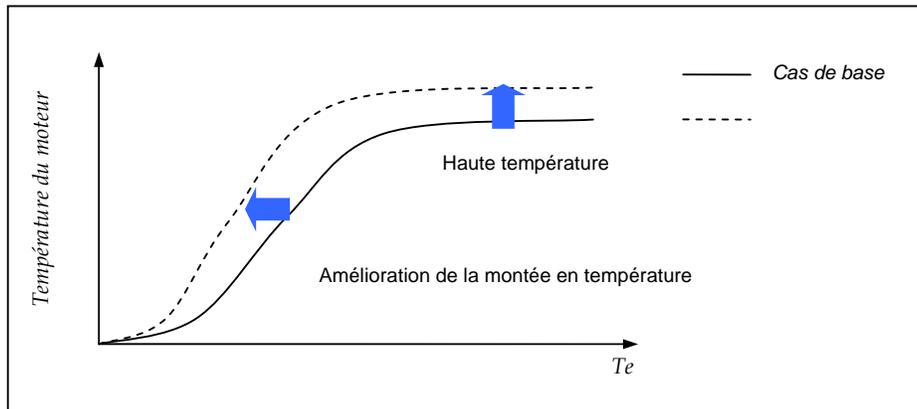


Fig. 2. Objectif de la gestion thermique lors d'un démarrage à froid.

OPTIMISATION GLOBALE ET SIMULATION

D'un point de vue globale, 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. L'objectif est de le rapprocher le plus possible du rendement idéal d'une machine de Carnot en d'autres termes d'améliorer le rendement exergetique. Effectivement, pour une prestation énergétique donnée, parmi toutes les machines thermodynamiques la machine de Carnot est celle qui consomme le minimum d'énergie. Certes, cette amélioration n'est pas sans subir la limitation des solutions technologiques. Une fois cette limite atteinte, la réduction de la consommation ne peut se faire que par la réduction ou la limitation de la prestation énergétique demandée au système. C'est la deuxième action dans laquelle s'inscrivent, à titre d'exemple, le développement d'accessoires énergétiquement moins gourmands et la réduction de la charge thermique nécessaire au confort dans l'habitacle. Les travaux présentés dans ce document s'inscrivent dans le cadre de la première action qui est l'amélioration du rendement global du véhicule par l'utilisation rationnelle de l'énergie. Actuellement, plusieurs fonctions telles que le refroidissement moteur, la dépollution des gaz d'échappement et les prestations de chauffage / climatisation sont traitées partiellement de façon séparée bien qu'elles soient fortement liées. Certes, l'amélioration des performances de chaque système indépendamment contribue à l'amélioration des prestations en général, mais il est d'une nécessité évidente, vu les fortes interactions, de résoudre le problème dans son intégralité en considérant les synergies possibles entre les systèmes. Le problème de la consommation énergétique n'est plus restreint uniquement au moteur mais s'étend à l'ensemble des systèmes. Il apparaît alors que l'optimum de la performance de l'ensemble des systèmes n'est vraisemblablement pas l'association des optima locaux de chaque système. L'optimisation globale qui est donc nécessaire constitue un de nos objectifs. Afin d'y arriver, il est nécessaire de connaître exactement :

- Les rapports énergétiques dans tous les systèmes
- Les mécanismes de couplage de ces systèmes entre eux puisque l'amélioration de l'un deux peut dégrader la performance d'un autre.

Le recours à la simulation dans ce cas devient nécessaire. Celle-ci remplace rentablement les essais expérimentaux. La démarche de modélisation suivie est détaillée au deuxième chapitre.

Plusieurs modèles thermiques et outils de simulation ont été développés au sein de Renault pour des applications diverses : aérothermique sous capot, montée en température du moteur, refroidissement moteur, machines tournantes, refroidissement de l'électronique de puissance, boucle de climatisation, thermique d'habitacle, prévention de l'embuage, performance du dégivrage, thermique de la ligne d'échappement, estimation de la consommation... Le couplage de ces différents modèles sous le même environnement de simulation débouchera sur un outil de simulation unique de gestion globale de la thermique. L'intérêt de ce projet est d'amener une meilleure appréhension des interactions entre les systèmes, d'améliorer le processus de définition technique de ces systèmes complexes, de permettre une approche globale, d'obtenir des lois de pilotage intégrables dans le calculateur du véhicule et d'optimiser les échanges énergétiques. Le but final est évidemment l'amélioration du rendement global du système. Cet outil doit permettre une simulation en régime dynamique. Son entrée est le cycle de roulage (NEDC) imposé au véhicule.

Deux critères d'optimisation principaux ont été mis en œuvre. Le premier est le rendement exergetique du véhicule entier. Cependant, l'amélioration du rendement exergetique n'échappe pas aux contraintes économiques. Il est démontré par observation que le coût d'un système augmente avec son rendement exergetique [6-8]. Le second critère adopté renferme, en plus de l'information exergetique, une information économique. Ce critère est le coût de revient de la prestation du système qui dépend à la fois du coût des ressources et du prix du système. Ce genre d'étude est connu sous le nom de « thermoéconomie » ou encore « exergoéconomie ». Son principe est détaillé au cinquième chapitre. Nous nous contenterons ici d'illustrer, à la figure 3, la dégradation de l'optimum exergetique lorsqu'un critère de type monétaire est appliqué au problème. Si X est la variable à optimiser, il est clair que les contraintes économiques qui sont d'ailleurs très fortes dans le domaine industriel n'amène pas un optimum thermodynamique.

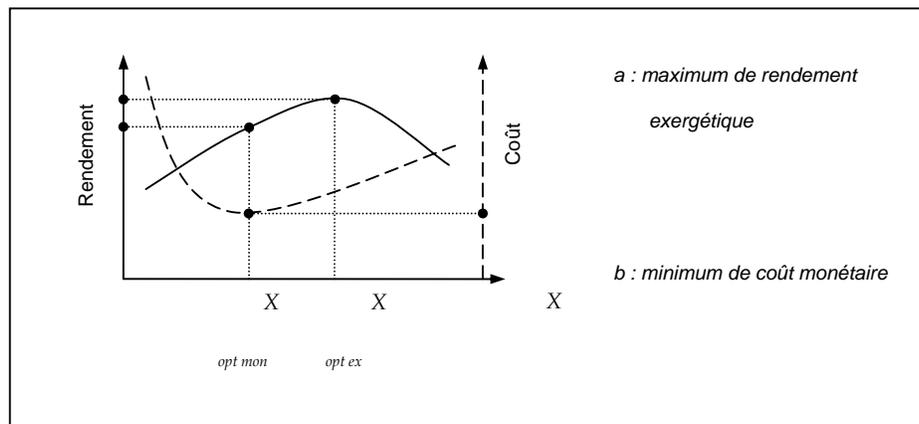


Fig. 3. Les optima exergetique et économique d'un système.

Le bilan exergetique servira à évaluer la performance de chaque composant au sein du système ainsi que celui du système global lui-même. Le critère de comparaison des différentes solutions de gestion de la thermique globale est le rendement exergetique. Celui-ci mesure l'éloignement du système réel du système idéal réversible. Ce dernier présente le meilleur rendement énergétique que le système réel peut atteindre dans ses conditions d'opération ; c'est le rendement de Carnot.

$$\eta_{ex} = \frac{\eta_{\acute{e}n.r\acute{e}el}}{\eta_{\acute{e}n.id\acute{e}al}} = \frac{\eta_{\acute{e}n.r\acute{e}el}}{\eta_{carnot}} \quad (1)$$

Lorsque la performance du syst\eme est \acute{e}valu\ee en dynamique, l'expression suivante est adopt\ee :

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_f + (Ex_{acc} > 0)}{Ex_r + |Ex_{acc} < 0|} \quad (2)$$

avec :

Ex_f l'exergie utile fournie par le syst\eme [J]

Ex_r l'exergie re\ueue par le syst\eme [J]

Ex_{acc} l'exergie accumul\ee par le syst\eme [J]

Ces termes sont le r\esultat d'int\egrations dans le temps de leurs termes de puissances respectifs. Le rendement d\efini par l'expression (2) est d\enommi\ee « rendement exergetique cumul\ee ». Dans le cas d'utilisation des termes de puissances, on parle de « rendement instantan\ee ». Dans l'expression (2), le terme d'accumulation est pris au num\erateur lorsqu'il est positif et inversement au d\enominateur lorsqu'il est n\egatif. Dans le cas du v\ehicule conventionnel, l'exergie est le plus souvent accumul\ee sous forme thermique. Le sort de la partie accumul\ee n'est pas connu pr\eealablement \aa un instant donn\ee. Les d\efinitions du rendement avec et sans le terme d'accumulation constituent respectivement les limites sup\erieure et inf\erieure du rendement final (fig. 4). Ce dernier d\epend du niveau d'utilisation de l'exergie accumul\ee. Si elle a \et\ee enti\erement utile, le rendement final correspondrait au rendement avec le terme d'accumulation. C'est le sc\enario le plus favorable. Au contraire, si aucun profit n'a \et\ee pris de l'exergie accumul\ee 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'apr\es refroidissement total des masses chaudes. Pour augmenter les chances d'utilisation de l'exergie accumul\ee, des syst\emes de stockage de chaleur ou de froid sont int\egr\es. Dans les v\ehicules hybrides, l'exergie accumul\ee sert \aa maintenir le confort dans l'habitacle pendant les phases d'arr\et ou m\eme \aa acc\elerer la mont\ee en temp\erature du moteur thermique (comme dans le cas de Prius de Toyota).

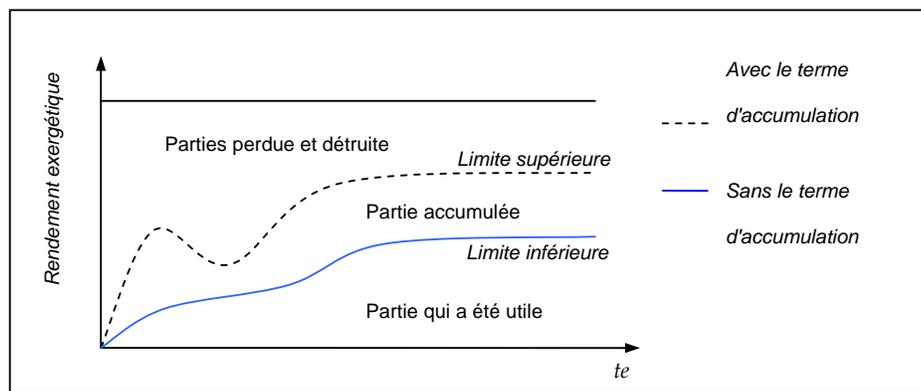


Fig. 4. Evolution dans le temps du rendement exergetique cumul\ee.

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. Cette frontière enveloppe le véhicule dans sa globalité avec tous ses sous-systèmes (fig. 5). Tant que l'exergie contenue dans les gaz d'échappement n'a pas un effet utile, elle est considérée comme perdue. Afin de faire apparaître comme pertes toutes les potentialités contenues dans les gaz de combustion (imbrûlés, exergie physique,...) la frontière du volume de contrôle est élargie suffisamment de sorte à englober tout gradient dans les grandeurs intensives (température, pression, concentration,...). C'est pourquoi au niveau de l'échappement le volume de contrôle s'élargit (fig. 5). En d'autres termes, ce volume de contrôle choisi englobe toutes les irréversibilités dans le système et son environnement. Toutes les pertes d'exergie transportées par les gaz d'échappement sont ainsi détruites après dilution dans l'atmosphère. Pour cela Borel et Favrat [10] élargisse systématiquement la frontière suffisamment pour pouvoir formuler les hypothèses suivantes :

- La combustion se poursuit dans les gaz d'échappement jusqu'à devenir complète
- Les produits de la combustion se refroidissent jusqu'à la température ambiante par transfert de chaleur à l'atmosphère
- Les constituants gazeux diffusent jusqu'à leur pression partielle dans une atmosphère moyenne

Ces hypothèses permettent de ramener l'état des gaz d'échappement à l'état de référence et donc de détruire complètement leur exergie.

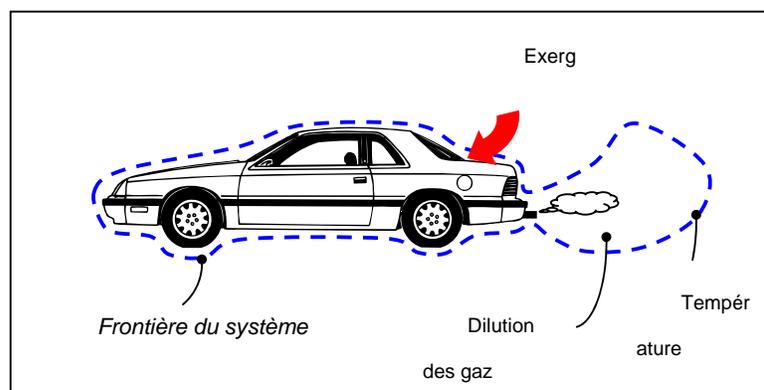


Fig. 5. Volume de contrôle du système servant à la définition du rendement exergetique.

Le système global admet une seule ressource qui est l'exergie du carburant et fournit plusieurs prestations :

- Déplacement du véhicule (exergie mécanique)
- Confort thermique : chauffage ou rafraîchissement de l'habitacle
- Confort d'utilisation du système : direction assistée, système d'aide au parking, système de navigation, frein à main automatisé, système de départ assisté,...

- Sécurité : différents consommateurs électriques, phares, dégivrage et désembuage du pare-brise, ABS, ESP (contrôle électronique de la trajectoire), système antipatinage,...
- Préservation de l'environnement : filtre à particule (la régénération de ce filtre nécessite une surconsommation),...

Dans l'étude suivante, seules les prestations les plus consommatrices sont considérées. Celles-ci sont le déplacement du véhicule, le confort thermique, et la direction assistée (fig. 6). Une consommation électrique forfaitaire de deux ampères est ajoutée aussi comme prestation. La direction assistée est représentée par une demande de couple constante de 2 Nm à l'arbre du moteur.

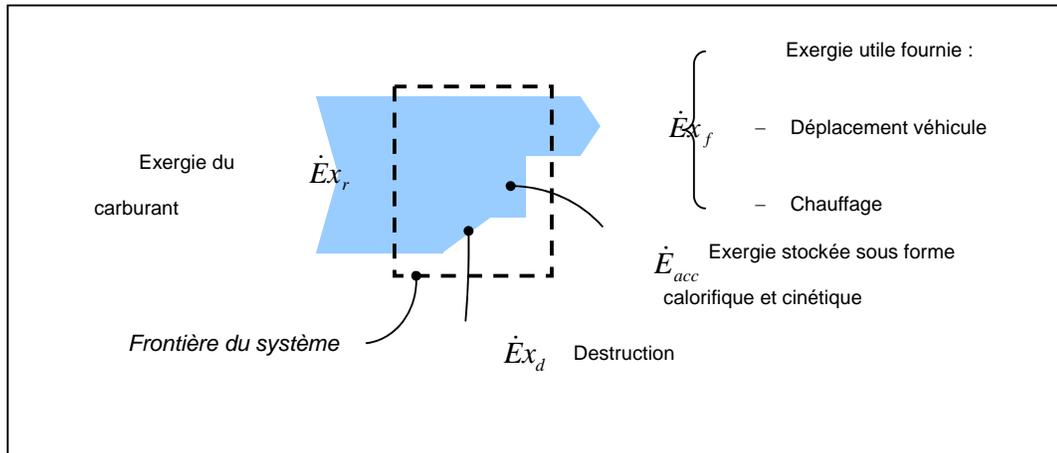


Fig. 6. Les termes définissant le rendement exergétique global.

Comme mentionné, l'étude exergétique permet de diagnostiquer le système. Le nombre d'irréversibilité adimensionnel, compris entre 0 et 1, 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 exergétiques.

$$N_{irr} = \frac{Ex_{d,composant}}{Ex_{d,sys}} \quad (3)$$

avec :

$Ex_{d,composant}$ l'exergie détruite par le composant, cumulée dans le temps [J]

$Ex_{d,sys}$ l'exergie totale détruite par le système, cumulée dans le temps [J]

Dans le processus d'amélioration du rendement exergétique du système, une attention particulière devrait être portée aux composants qui présentent des nombres d'irréversibilité élevés.

CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans une logique de préservation de l'environnement et son objectif ultime est l'utilisation rationnelle de l'énergie. Différentes actions existent pour atteindre ce but. L'étude se base sur une approche d'optimisation globale. Pour cela deux critères doivent être

utilisé : l'étude exergetique et la thermoéconomie. Le premier permet d'évaluer et de diagnostiquer le degré d'imperfection d'un système. Le second ajoute à l'étude exergetique une couche de critère supplémentaire de type monétaire. Pratiquement, les deux critères adoptés sont le rendement exergetique et le coût de revient de la prestation du système. La simulation permettra d'évaluer ces critères. L'outil final de simulation se basera sur des modèles développés et validés en interne. Il regroupera, sous le même environnement de simulation, l'ensemble des modèles des systèmes thermiques d'un véhicule et permettra ainsi d'améliorer les connaissances quant aux interactions complexes entre ces mêmes systèmes.

References

- [1] ACEA CO2 commitment. 15p.
- [2] CATANIA Sandrine. *Les véhicules particuliers en France : Données et Références*. ADEME, 2003, 16 p.
- [3] FARRINGTON Rob et.al. *Fuel consumption and associated CO2 emissions due to MACs*. MACs Summit, Bruxelles, 2003, 47 p.
- [4] DORANGE A. *La climatisation automobile : la clim aggrave l'effet de serre*. 2001.
- [5] GEELS P-Y, GESSIER B., CHANFREAU M., TARQUIS M. *Advance control strategy for modern engine cooling thermal systems, and effect on CO2 and pollutant reduction*. VTMS6 C599/011/2003, 2003, 10 p.
- [6] BEJAN A., TSATSARONIS G., MORAN M. *Thermal design and optimisation*. Wiley, 1996, 542p.
- [7] BENELMIR R. *Optimisation thermoéconomique des systèmes et procédés énergétiques*. Habilitation à diriger des recherches. Nancy: Université Henri Poincaré, 1998, 191p.
- [8] BENELMIR R. *Cours d'optimisation énergétique : analyse économique, analyse exergetique, optimisation thermoéconomique*. 2003, 49p.