

# Moteur à combustion interne : stockage thermique pour la réduction des émissions et de la consommation

V. ATIM KOKONJJI<sup>ab</sup>, S. KHELLADI<sup>a</sup>, F. BAKIR<sup>a</sup>, R. YU<sup>b</sup>

a. Laboratoire DynFluid, Arts et Metiers ParisTech, 151 Bd de l'Hôpital 75013 PARIS

b. Renault S.A.S, site Technocentre, 1 Avenue du Golf, 78288 GUYANCOURT

## Résumé :

Le démarrage à froid de moteur à combustion interne constitue à ce jour un point faible sur le cycle européen de référence NEDC<sup>1</sup>. La surconsommation y est évaluée entre 15% et 20% couplée avec un rejet de polluants de type HC (Hydrocarbures imbrulés). Cette surconsommation s'explique entre autres par l'existence de frottement interne moteur plus importante durant la phase de montée en température moteur et également par la mauvaise combustion due à un niveau de température de parois de zones de combustion inférieur au niveau optimal. L'une des solutions pertinente consiste à accélérer la montée en température moteur par valorisation de l'énergie thermique contenue dans le liquide de refroidissement. Au circuit de refroidissement conventionnel est greffé un dispositif de stockage de liquide chaud à l'arrêt du moteur. Au démarrage à froid, le liquide chaud est déstocké dans le moteur de sorte à accélérer la montée en température de ce dernier. L'originalité du procédé qui fait l'objet de la présente étude réside dans l'introduction d'une certaine quantité d'air dans le circuit de refroidissement du moteur de manière à maintenir l'inertie thermique globale de la motorisation au niveau actuel. La présence d'air nécessite une purge rapide du circuit de refroidissement les premiers instants de démarrage moteur. Ce verrou est levé par la conception d'un séparateur diphasique adapté qui intègre les contraintes automobiles de type thermohydrauliques (température, débit variable, régime d'écoulement diphasique,...) et autres comme les considérations d'encombrement, de poids présents sur un véhicule. Les gains attendus sur la consommation se situent entre 1% et 4% et sur les émissions CO et HC entre 10% et 30% sur le cycle NEDC.

## Abstract:

To date, cold start of internal combustion engine is for the time being a weak point on the NEDC reference driving cycle. Over-consumption is estimated from 15% to 20% coupled with emissions of pollutants like HC (unburned hydrocarbons). This over-consumption is partly explained by the existence of internal friction engine more important during the startup phase than usual and by a wall temperature of combustion zones below the optimal level. One solution is to accelerate the increase in temperature of engine by recovery the thermal energy content of the coolant. In conventional cooling system, we add to the conventional cooling system a storage device of the hot liquid at the stop engine. At cold start, warm liquid is removed from storage tank to the engine so as to accelerate the rise temperature phase. The originality of the studied process is the introduction of air in the cooling circuit of the engine. This approach allows maintaining the thermal inertia of the engine at the current level. The presence of air requires efficient degassing of the cooling circuit the first moments of starting up of the engine. This lock is surmounted by designing a two-phase separator that incorporates the constraints of on the automobile like size, weight, etc. The expected gains in consumption are around 4% and CO and HC emissions between from 20% to 30% on the cycle NEDC.

**Mots Clés :** Stockage thermique / Moteur à combustion interne / Démarrage à froid.

## 1. Introduction

En dépit des accords de Kyoto ratifiés par la plupart des pays industrialisés, les émissions globales de gaz à effet de serre (GES) n'ont cessé de croître ces dernières années.

<sup>1</sup> NEDC: New European Driving Cycle.

Au niveau mondial, le secteur automobile représente le deuxième secteur émetteur de CO<sub>2</sub>, principal GES. Ce secteur représente en France le quart des émissions de GES. Le transport routier concentre à lui seul l'essentiel du CO<sub>2</sub> du secteur automobile soit 85%<sup>2</sup>. A l'échelle européenne, les constructeurs automobiles, poussés par les gouvernements<sup>3</sup>, se sont engagés à proposer des véhicules sobres en consommation de carburant et en émissions de polluants sur la base de l'indicateur CAFE (Corporate Average Fuel Economy). Dans ce contexte, différentes technologies d'amélioration du rendement du GMP (Groupe Moteur Propulseur) ont émergé ces dernières années : thermique moteur et habitacle [1-10], la récupération d'énergie au freinage ou en fonctionnement [11-14], etc.

Des solutions techniques dans le cadre d'une stratégie globale dite « Thermomanagement »<sup>4</sup> ont été élaborées par les entreprises du secteur automobile [4]. Ces solutions s'appuient sur différents principes qui concourent à l'amélioration du rendement du moteur et des systèmes connexes de manière à réduire la consommation de carburant et les émissions de polluants. De manière non exhaustive, on peut relever le principe de montée en température rapide du moteur (huile moteur, boîte de vitesse, parois du moteur,...) par le stockage latent ou sensible de la chaleur [1, 2, 7-10], le blocage du refroidissement du moteur et la réduction du volume à chauffer [4]. Un autre principe s'appuie sur l'utilisation rationnelle de l'énergie par des solutions comme la récupération des calories à l'échappement et la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique ou mécanique [11-14]. D'autre stratégie concerne la régulation haute température par l'intermédiaire d'un thermostat piloté couplé dans certain cas avec une pompe électrique [5].

Plusieurs constructeurs et équipementiers automobiles ont travaillé sur des dispositifs de stockage de la chaleur sensible ou latente contenu dans le liquide de refroidissement. A ce jour, seul le constructeur Toyota est arrivé au stade de commercialisation sur la version PRIUS 2 USA. Les principaux brevets sur le système de stockage de chaleur ont été déposés par les constructeurs et équipementiers automobiles comme Denso, Toyota, Valeo, PSA, Renault. La plupart de ces travaux sont restés au stade de recherche et développement.

Le stockage thermique latent suppose de disposer d'un caisson-échangeur calorifugé dans lequel l'échange se réalise entre le liquide de refroidissement et les matériaux à changement de phase. A ce jour, cette technique présente plusieurs inconvénients : coût élevé, difficulté de recharge efficace de l'accumulateur après la restitution de la chaleur, grande inertie thermique, stockage partiel du fait de la qualité d'échange.

Le stockage de chaleur sensible apporte des réponses aux carences du stockage thermique latent de part une relative simplicité de mise en œuvre et un coût relativement réduit. Il existe principalement deux procédés de stockage de la chaleur sensible du liquide de refroidissement avec une diversité de dispositif à la fois en termes de mise en œuvre (composants et commandes utilisés) et de techniques de transfert du liquide. Ces procédés s'appuient sur un critère simple basé sur la « vidange » ou la « non vidange » du moteur.

Le concept de « non vidange », comme son nom l'indique, n'implique pas la vidange du moteur chaud lors de l'arrêt. Le liquide de refroidissement chaud est pompé et envoyé vers le réservoir calorifugé. Le remplissage du réservoir permet de chasser le liquide froid vers le moteur. Lors du démarrage à froid, le liquide chaud contenu dans le réservoir isolé est déstocké dans le moteur. Le déstockage pousse le liquide froid vers le réservoir. En dépit d'une simplicité de mise en œuvre, l'efficacité de ce concept est diminuée par le mélange entre le liquide chaud et le liquide froid aussi bien dans le réservoir que dans le moteur pendant les phases de stockage et de déstockage. Le concept de « vidange » partielle ou totale du circuit de refroidissement ne présente pas les inconvénients des circuits connus. Ce concept se caractérise par l'introduction de quantité d'air dans le circuit de sorte à garder inchangé le volume de liquide de refroidissement présent sur le véhicule. La quantité d'air introduite équivaut au volume offert par le circuit secondaire à savoir le réservoir de stockage calorifugé et les moyens de transfert (pompe, vannes, durite,...).

La solution qui fait l'objet de la présente étude est conforme au concept dit de « vidange » du liquide de refroidissement du moteur. L'intérêt du stockage thermique se situe au niveau de la valorisation d'une source d'énergie interne dans le but d'accélérer la montée en température du moteur. Cette technique permet d'atteindre plus rapidement les conditions optimales de fonctionnement du moteur correspondant au minima de consommation et d'émission de polluants.

<sup>2</sup> Source : statistique de l'OCDE 2005.

<sup>3</sup> En France, cela s'est traduit par la mise en place entre autres du dispositif « Bonus/Malus » dans le secteur automobile. Une incitation fiscale qui a permis de baisser la moyenne d'émission de CO<sub>2</sub> par kilomètre des véhicules neufs de 149 grammes en 2007 à 131 grammes en 2010 représentant une réduction de 12% (source : ministère français de l'économie et des finances).

<sup>4</sup> Thermomanagement : approche de gestion thermique globale automobile déclinée en différentes stratégies et solutions de réduction de la consommation et des émissions de polluants.

Les verrous technologiques et scientifiques se situent au niveau de la conception du circuit hydraulique et la problématique de dégazage du moteur les premiers instants de démarrage du fait de la présence d'air dans le circuit. La méthode utilisée est une méthode expérimentale avec un véhicule équipé du dispositif de stockage et de transfert du liquide de refroidissement. L'accélération de la montée en température est quantifiée sur la base d'un moteur instrumenté en thermocouple. Des mesures de la consommation et de rejet de polluants réalisées sur un banc dynamique avec le profil de roulage NEDC permettent d'évaluer les gains induits par le procédé.

## 2. Description du procédé

D'une manière générale, la mise en œuvre du procédé de stockage thermique met en jeu un circuit hydraulique principal tel que présent sur les véhicules conventionnels et un circuit hydraulique secondaire permettant le transfert et le stockage du liquide de refroidissement chaud (FIG. 1).

Les principaux composants du circuit principal sont le moteur (1), le radiateur de refroidissement (2), le radiateur de chauffage ou aérotherme (3), le vase d'expansion (4) et la pompe mécanique (5). Le circuit secondaire comprend un réservoir calorifugé (6) servant de moyens de stockage du liquide chaud, une pompe électrique (7) pour le transfert du liquide de refroidissement, un séparateur diphasique (8) pour assurer la purge du circuit et des électrovannes pilotées par des moyens de commandes non représentés.

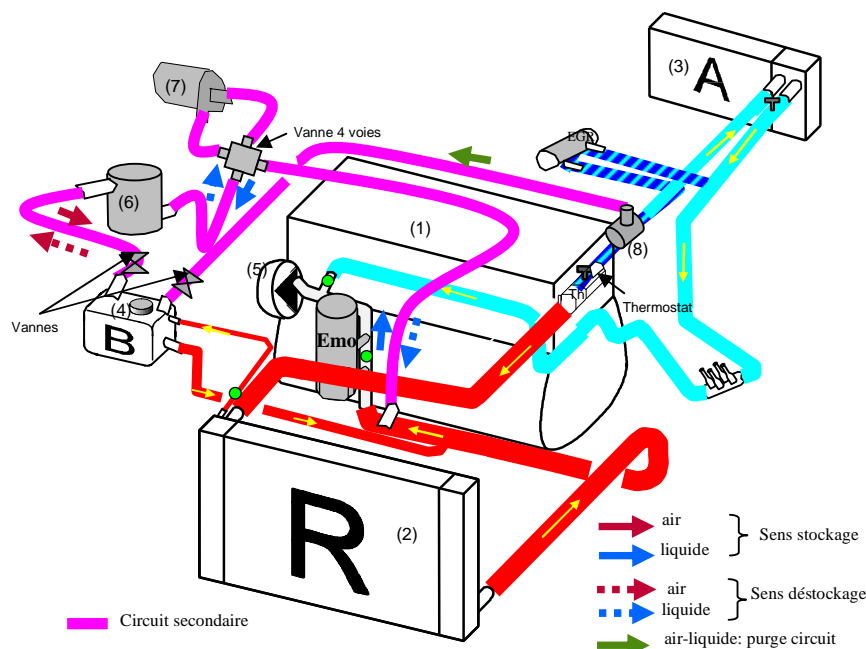


FIG. 1 – Schéma de principe du circuit hydraulique du procédé

En termes d'originalité, le procédé breveté par Renault S.A.S [1] se distingue par la présence d'air dans le circuit de refroidissement du moteur. En fonctionnement moteur, le circuit principal contient le liquide de refroidissement et le circuit secondaire isolé du circuit principal est rempli d'air. Le moteur fonctionne normalement. A l'arrêt du véhicule, le liquide chaud est aspiré par la pompe électrique du moteur vers le réservoir calorifugé. C'est la phase de « stockage ». Le remplissage du réservoir calorifugé pousse l'air vers le moteur. Au démarrage du moteur (suite à un arrêt prolongé), le liquide chaud est transféré par la pompe électrique du réservoir de stockage vers le moteur en premier lieu puis vers les autres composants du circuit principal. C'est la phase de « déstockage » durant laquelle l'air retourne vers le réservoir calorifugé. Le déstockage s'accompagne d'un mélange entre le liquide chaud et l'air dans le moteur nécessitant une purge du circuit de refroidissement durant des premières minutes de démarrage. Cette purge est indispensable pour garantir le bon fonctionnement du GMP. En effet, l'existence de poches d'air dans le moteur peut entraîner localement des montées excessives de la température par rupture de refroidissement, notamment dans la culasse de part son architecture. Ces poches d'air peuvent également altérer le bon fonctionnement de la pompe. La conception d'un séparateur diphasique air-eau adapté aux contraintes automobiles et positionné en sortie moteur apporte une réponse à ce qui constitue le principal verrou de mise en œuvre du procédé.

### 3. Pertinence du stockage de chaleur sensible

En effet, le « démarrage à froid » d'un moteur à combustion interne se caractérise par une phase de montée en température de la masse métallique du moteur, du liquide de refroidissement et de l'huile plus ou moins longue suivant le régime moteur et la charge appliqués (FIG. 2). Cette phase s'accompagne de consommation de carburant et de rejet de polluants supérieurs à la situation moteur « chaud ». Plusieurs raisons à cela, les principales sont les suivantes :

- (i) Le niveau de température de l'huile est inférieur au niveau optimal. La mauvaise qualité de la lubrification se traduit par des frottements plus élevés au niveau des pièces mobiles.
- (ii) Le rendement de combustion est faible du fait de parois de combustion froides.

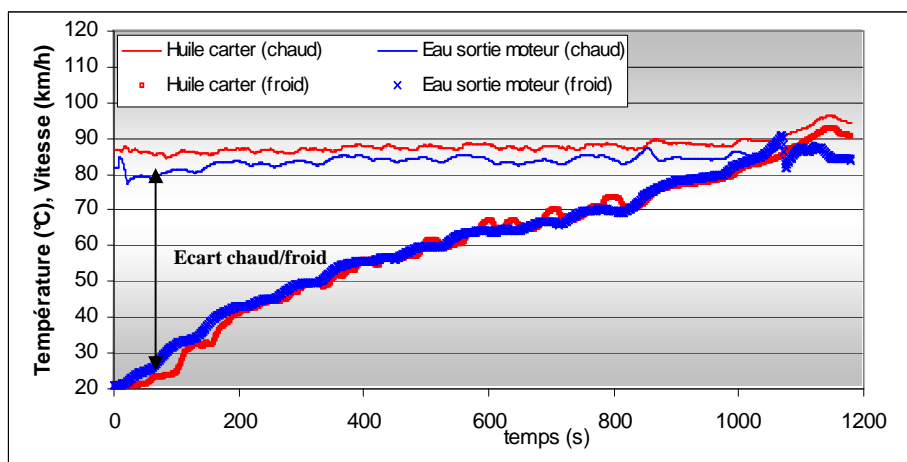


FIG. 2 – Profil de montée en température de moteur à combustion interne automobile sur NEDC

Réduire la surconsommation de carburant et les rejets de polluants observés lors de démarrage à froid (FIG. 3 & FIG. 4) revient à réduire sensiblement la phase de montée en température du moteur. Cela suppose de porter le moteur à un niveau thermique proche de son niveau optimal dès les premiers instants de démarrage. La température initiale du moteur a une incidence prépondérante sur la consommation de carburant (FIG. 3).

La pertinence du stockage thermique réside dans une meilleure gestion thermique globale par valorisation d'une source d'énergie existante. Le bénéfice thermique se situe à la fois sur l'amélioration du rendement du moteur par réduction des pertes thermiques et aussi sur l'accélération de la montée en température du moteur avec une incidence sur la consommation et les émissions de polluants.

Une analyse sommaire de la répartition de l'inertie thermique d'un moteur et de son circuit de refroidissement (TABLEAU 1) montre que le liquide de refroidissement représente 25% de l'inertie thermique globale du moteur. La vidange à l'arrêt du moteur permet de réduire dans les mêmes proportions l'inertie globale du système de refroidissement. La montée en température du moteur se trouve plus accélérée que dans la situation des procédés connus. En dépit de la problématique de purge du moteur au démarrage, la relative simplicité de mise en œuvre au vu du bénéfice thermique potentiel fait de ce procédé une piste intéressante dans les stratégies de thermomanagement élaborées par certains constructeurs automobiles.

	EAU-GLYCOL	HUILE	MASSE METALLIQUE	
			FONTE	ALUMINIUM
Volume (L)	6,5	5		
Masse (kg)	6,5	4,5	90	15
Cp (J/(kg.°C))	3560	1879	500	890
MCp (KJ/°C)	23	8,5	45	13,4
MCp (%)	25%	10%	50%	15%

TABLEAU 1 – Répartition de l'inertie thermique d'un moteur

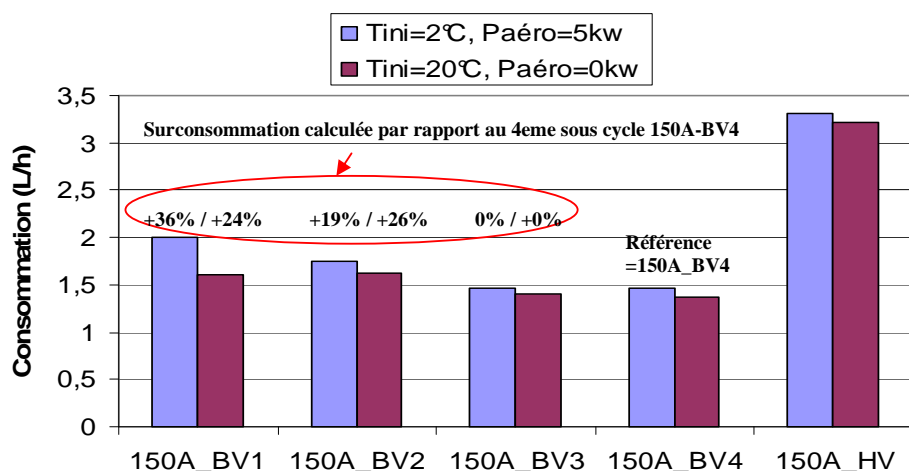


FIG. 3 – Consommation de carburant d'un moteur à combustion interne sur NEDC

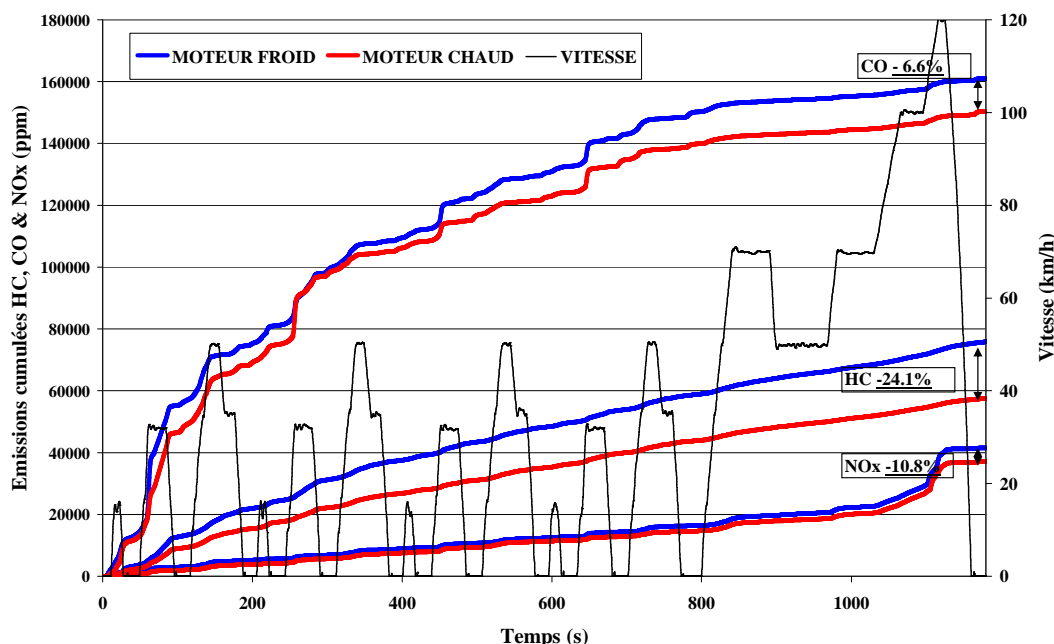


FIG. 4 – Profil des émissions de polluants sur NEDC entre un moteur chaud et un moteur froid

#### 4. Résultats attendus et discussion

Les gains escomptés en termes de réduction de la consommation se situent entre 1% et 4% suivant le dispositif hydraulique mis en œuvre et la stratégie de stockage et de déstockage du liquide de refroidissement. Ces gains sont plus significatifs sur les polluants, entre 10% et 30%, notamment les HC. En effet, le procédé agissant principalement lors du démarrage à froid, son impact attendu est plus conséquent sur les HC beaucoup plus présent au démarrage.

La mise en œuvre du procédé introduit un défi majeur : la purge rapide du circuit durant les premiers instants de démarrage. Les techniques de séparation diphasique sont assez bien connues et maîtrisées dans certains secteurs d'activité comme la chimie, l'industrie pétrolière, etc. A ce jour, ces technologies sont essentiellement destinées à des applications lourdes de type offshore, en régime stabilisé à fort débit de mélange [15-17]. Elles se caractérisent par un impératif d'encombrement et une valeur ajoutée du produit relativement élevée justifiant l'utilisation de système mécanique consommateur d'énergie (séparateur à pompe centrifuge).

Les problématiques d'encombrement et de réduction de coût présentes dans le secteur automobile supposent de revoir et d'adapter la conception du séparateur gaz-liquide en s'appuyant sur le développement de technologie de séparation compacte et "active " de part la géométrie interne du séparateur.

Les aspects hydrauliques et thermiques sont fortement interdépendants : la qualité de la vidange du moteur, les déperditions du bocal de stockage du liquide chaud, la manière d'introduire le liquide chaud dans le moteur et bien d'autres aspects impactent directement l'efficacité du procédé. Le couplage plus ou moins fort entre ces paramètres ainsi que les considérations de masse, d'intégration, de sécurité constituent des éléments de conception et d'optimisation du procédé.

## 5. Conclusion

Au vu de la corrélation entre d'une part la montée en température d'un moteur à combustion interne et d'autre part la consommation de carburant et les émissions de polluants, le stockage de chaleur sensible du liquide de refroidissement par vidange présente un potentiel intéressant. Le verrou technologique posé par l'impératif de purge du circuit les premiers instants de démarrage est résolu par la conception d'un séparateur diphasique adapté aux contraintes de débit et d'encombrement spécifiques à l'environnement automobile.

Un prototype sur véhicule a été conçu et réalisé. Des essais sur le cycle NEDC au banc dynamique sont programmés pour quantifier les gains induits par le procédé.

## Références

- [1] R. Yu. Procédé et dispositif pour préchauffer le moteur à combustion interne d'un véhicule automobile. Brevet Renault FR2905737, 2008.
- [2] G. Olivier, R. Yu. Dispositif de réchauffage pour moteur thermique et véhicule automobile comportant un tel dispositif. Brevet Renault FR2914960, 2008.
- [3] E. Condemine. Method for managing an internal combustion engine. Brevet Peugeot Citroen Automobiles FR2858026, 2005.
- [4] F. Melzer, U. Hesse, G. Rocklage, M. Schmitt . Thermomanagement. SAE international, 1999-01-0238.
- [5] J.R. Wagner , V. Srinivasan, D.M. Dawson, E.E. Marotta . Smart thermostat and coolant pump control for engine thermal management systems. SAE international, 2003-01-0272.
- [6] Terry J. Hendricks. Heat pipe / two phase flow systems for vehicle passenger cabin cooling. SAE international, n° 1970, 2002.
- [7] K. M. Ozeki Yoshifumi. Heat storage device for vehicle. Brevet Denso JP2002256871, 2002.
- [8] Y. Aikawa. Heat storage system for vehicle, with absorbent. Brevet Denso FR2837430, 2003.
- [9] K. Kanada. Heat accumulator with agitating function. Brevet Denso US5957193, 1999.
- [10] M. Yoshimura. Latent heat recovery heat exchanger. Brevet Panasonic JP2004353964, 2004.
- [11] L. Brandenburg. Hybrid electric vehicle regenerative braking energy recovery system. Brevet Ford Global Technologies US5291960, 1994.
- [12] S. Iwata. Stirling engine thermoelectric cogeneration system. Brevet Osaka Gas JP2005198383, 2005.
- [13] Akehurst, Hawley, Pegg, Piddock. Front End Auxiliary Drive (FEAD) configurations focusing on CO2 benefits. SAE international, 2004-01-0596.
- [14] M. Barbier. Dispositif de récupération d'énergie au freinage par génératrice éolienne. Brevet Peugeot Citroen Automobiles FR2943586, 2010.
- [15] G.E. Kouba and O. Shoham. A review of gas-liquid cylindrical (glcc) cyclone technology. International Conference on Production Separation Systems, 1996.
- [16] J.R. Nebrensky, G.E. Morgan, and B.J. Oswald. Cyclone for gas-oil separation. International Conference on Hydrocyclones, pages 167\_178, 1980.
- [17] E.S. Rosa, F.A. França, and G.S. Ribeiro. The cyclone gas-liquid separator: operation and mechanistic modeling. Journal of Petroleum Science and Engineering, 32:87\_101, 2001.
- [18] S. Neti, O. E. E. Mohamed. Numerical simulation of turbulent two-phase flows. Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 11. No. 3, 204\_213, 1990.
- [19] G. Hetsroni. Handbook of multiphase systems. McGraw-Hill Book Company, part 2. 1982.
- [20] C. Colin, J.A. Fabre, and A.F. Dukler. Gas-liquid flow at microgravity conditions - i. dispersed bubble and slug flow. Int. J. Multiphase Flow, 17:533\_544, 1991.