



**HAL**  
open science

## Construction de modèles environnementaux de véhicules pour l'évaluation environnementale des innovations

Julien Garcia, Pierre Tonnelier, Dominique Millet

### ► To cite this version:

Julien Garcia, Pierre Tonnelier, Dominique Millet. Construction de modèles environnementaux de véhicules pour l'évaluation environnementale des innovations. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440547

**HAL Id: hal-03440547**

**<https://hal.science/hal-03440547v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Construction de modèles environnementaux de véhicules pour l'évaluation environnementale des innovations

J. GARCIA<sup>a,b</sup>, D. MILLET<sup>a</sup>, P. TONNELIER<sup>b</sup>

a. Laboratoire d'ingénierie des systèmes mécaniques et des matériaux (LISMMA), place G. POMPIDOU, 83000 TOULON

b. PSA Peugeot Citroën, route de Gizy, 78140 VELIZY-VILLACOUBLAY

## Résumé :

*Nous proposons dans cet article d'expérimenter la création de modèles environnementaux de véhicules automobiles qui pourront être utilisés dans l'évaluation environnementale des innovations. Pour ce faire, les analyses du cycle de vie de treize véhicules ont été collectées. Des traitements statistiques de classification ascendante hiérarchique leur ont été appliqués pour construire des dendrogrammes. Un processus itératif de regroupement permet ensuite d'identifier les classes optimales par dendrogramme en fonction de deux conditions de validité, formant ainsi les modèles environnementaux cherchés. Une analyse des classes permet de montrer qu'une stratégie de discrimination des étapes du cycle de vie et des indicateurs environnementaux semble la plus intéressante pour générer de la connaissance.*

## Abstract :

*In this paper, we propose to test the design of environmental models of vehicles that will be used in the environmental evaluation of innovations. In order to do this, the life cycle assessments of thirteen vehicles have been collected. Hierarchical clustering has been applied on them to produce dendrograms. Then, an iterative process allows the identification of optimal clusters per dendrogram according to two validity conditions. Thus, the environmental models are produced. The analysis of the clusters shows that a discrimination strategy of the life cycle steps and of the environmental indicators seems to be the most interesting in order to generate knowledge.*

**Mots clefs :** analyse du cycle de vie (ACV), innovation, automobile, classification ascendante hiérarchique (CAH), modèles environnementaux de véhicules (MEV)

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte

Pour aider les entreprises à amorcer une démarche d'éco-conception, de nombreux outils ont été développés dont la majorité adopte une philosophie similaire à la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Une ACV consiste à évaluer les impacts environnementaux (réchauffement climatique, eutrophisation de l'eau ...) commis par chacune des étapes du cycle de vie (fabrication, utilisation ...) d'un produit [1]. Pour les entreprises qui produisent des gammes de produits complexes tels que l'automobile, les innovations sont en grande majorité peu intrusives, concernent des sous-systèmes ou des composants, et sont de type incrémental [2].

Graedel et al. [3] rappellent que l'éco-conception d'un système complexe peut être réalisée au niveau du système global ou au niveau du sous-système ou du composant. Dans le premier cas, une évaluation environnementale permet de proposer des actions à grande échelle comme comparer différents choix d'architecture produit, ou de matériaux ; la mise en œuvre de ce type d'actions est toutefois difficile car d'une part elle exige de posséder suffisamment de données pour réaliser l'évaluation, et d'autre part, elle engage des choix d'entreprise sur le long terme. Au contraire, l'évaluation environnementale d'un sous-système ou d'un composant est plus aisée car nécessite moins de données ; en revanche, les actions qui en découlent ont un impact plus faible.

Comme Keoleian et Kar [4], nous pensons qu'il est pertinent de pouvoir mettre en regard les actions au niveau composant et les conséquences au niveau du véhicule. Or l'évaluation environnementale de l'innovation est simplifiée s'il n'est pas nécessaire de réaliser l'ACV détaillée du véhicule futur. Nous proposons donc de construire des Modèles environnementaux de véhicules (MEV) afin d'obtenir une évaluation environnementale du futur véhicule. Le futur véhicule qui accueillera l'innovation est alors représenté par un MEV auquel l'innovation est jointe.

## 1.2 Problématique

Parmi les axes de recherche actuels en ACV existe celui sur l'évaluation d'un système complexe au cours de sa conception. Dans ce cadre, la stratégie développée par Rio et al. [5] est supportée par la définition de méta-modèles pour réaliser des ACV, met en relation les équipes de conception et celle en charge de l'environnement, et facilite les échanges de données entre les outils utilisés par ces dernières. Nous pensons qu'une telle stratégie est peu adaptée pour une grande entreprise qui souhaite amorcer une démarche d'éco-conception ; en outre, nous faisons l'hypothèse que la génération d'une dynamique d'apprentissage en éco-conception repose sur l'utilisation d'outils simples.

Dès lors, nous adoptons une stratégie de construction de Modèles environnementaux de véhicules (MEV), représentant le futur véhicule, à partir de l'exploitation de données d'études précédentes. Pour ce faire, deux options sont envisageables : la première consiste à construire le modèle à partir des paramètres physiques du produit (bilans masse/matière, consommation ...), alors que la seconde consiste à exploiter les résultats des ACV précédentes. Pour la première option, plusieurs auteurs proposent d'identifier, en utilisant des méthodes de *clustering*, les paramètres de conception qui dimensionnent le produit et forment ainsi les données d'entrée d'une ACV simplifiée [6], [7], [8]. Pour la seconde option, des auteurs utilisent ces méthodes de *clustering* sur les profils environnementaux et définissent ainsi des typologies [9], [10], des classes [11] ou des familles [12] environnementales de produits jouant le rôle de référence dans une ACV comparative simplifiée. Nous pensons que la première option est peu adaptée dans le cadre d'une gamme de systèmes complexes, où les paramètres sont très nombreux. En revanche, la création de MEV par l'exploitation des ACV précédentes permet d'identifier les caractéristiques communes à différentes gammes de produits.

Dans cet article, nous proposons une méthode de création de MEV basée sur le traitement des résultats d'ACV précédentes par une Classification ascendante hiérarchique (CAH) [13], largement utilisée et adaptée à des jeux de données de petites tailles [14]. Notre problématique est alors 1) de déterminer la manière d'appliquer cette CAH aux ACV disponibles, et 2) de caractériser les MEV issus de la CAH.

## 2 Méthode de recherche

Nous disposons des ACV de 13 véhicules de même génération représentatifs de la gamme du constructeur en termes de segment (B : citadine, C : compacte, C+ : monospace, D : familiale, Crossover), motorisation (carburant, chaîne de traction), boîte de vitesse (manuelle, pilotée, automatique), finition (entrée, moyen, haut de gamme), et silhouette (berline, break, coupé) (Tableau 1).

Véhicule	Segment	Motorisation	Boîte de vitesse	Finition	Silhouette
V1	B	Diesel	Manuelle	Moyenne	Berline
V2	B	Diesel	Manuelle	Moyenne	Berline
V3	B	Essence	Pilotée	Haute	Berline
V4	B	Essence	Manuelle	Haute	Berline
V5	C	Essence	Manuelle	Moyenne	Break
V6	C	Essence	Manuelle	Moyenne	Berline
V7	C	Essence	Manuelle	Haute	Berline
V8	C+	Diesel	Manuelle	Haute	Monospace (7 Places)
V9	Crossover	Essence	Manuelle	Haute	Berline
V10	Crossover	Hybride	Pilotée	Haute	Berline
V11	D	Diesel	Pilotée	Haute	Berline
V12	D	Diesel	Automatique	Haute	Berline
V13	D	Hybride	Pilotée	Haute	Berline

TAB. 1 – Synthèse des caractéristiques des véhicules

L'unité fonctionnelle commune de ces ACV est la suivante : « Transport de personnes et de biens sur 150 000 km pendant 10 ans selon le cycle de conduite européen NEDC (*New European Driving Cycle*) ». Elle est construite sur un kilométrage et une durée de vie moyenne utilisés par la majorité des constructeurs automobiles. De plus, les mesures d'émissions de polluants ne sont disponibles que sur le cycle NEDC, permettant ainsi de comparer les véhicules. Nous reconnaissons toutefois que ce cycle n'est pas représentatif de la réalité et attendons de pouvoir réaliser cette recherche avec les nouveaux cycles de conduite automobile WLTC prévus pour 2013-2014.

Nous extrayons les résultats sur les étapes suivantes : fabrication, utilisation et maintenance, et fin de vie. Les indicateurs environnementaux retenus, calculés par la méthode CML 2001, sont les suivants : réchauffement climatique (indicateur *Global warming potential*, GWP, [kg CO<sub>2</sub>-Equivalent]), eutrophisation de l'eau (indicateur *Eutrophication potential*, EP, [kg Phosphate-Equivalent]), création d'ozone photochimique (indicateur *Photochemical ozone creation potential*, POCP, [kg Ethène-Equivalent]), et consommation de ressources abiotiques (indicateur *Abiotic depletion potential*, ADP, [kg Sb-Equivalent]).

Pour le traitement CAH des 13 ACV, les individus à classer sont les véhicules dont les variables de départ sont les indicateurs environnementaux exprimés dans des unités différentes ; nous utilisons donc les variables centrées réduites associées aux variables de départ. L'indice de dissimilarité  $d$  – ou distance entre individus – est la distance euclidienne, et l'indice d'agrégation  $D$  – ou distance entre classes – est la moyenne non pondérée.

Soient :  $V = \{v_k\}$  l'ensemble des véhicules dont les ACV sont disponibles ;  $x_{ijk}$  (respectivement,  $x_{jk}$ ) la valeur centrée réduite de l'indicateur environnemental  $j$  sur l'étape du cycle de vie  $i$  (respectivement, sur l'ensemble de son cycle de vie) du véhicule  $k$ .

Il existe alors quatre manières de calculer les indices de dissimilarité, et autant de groupes de dendrogrammes :

- Groupe (D1) : cumul des indicateurs et des étapes :  $d^2(v_{k_1}; v_{k_2}) = \sum_j (x_{jk_1} - x_{jk_2})^2$ , 1 dendrogramme ;
- Groupe (D2) : cumul des étapes et par indicateur :  $d^2(v_{k_1}; v_{k_2})_j = (x_{jk_1} - x_{jk_2})^2$ , 4 dendrogrammes ;
- Groupe (D3) : cumul des indicateurs et par étape :  $d^2(v_{k_1}; v_{k_2})_i = \sum_j (x_{ijk_1} - x_{ijk_2})^2$ , 3 dendrogrammes ;
- Groupe (D4) : par étape et par indicateur :  $d^2(v_{k_1}; v_{k_2})_{ij} = (x_{ijk_1} - x_{ijk_2})^2$ , 12 dendrogrammes.

Dans tous les cas, l'indice d'agrégation entre deux classes  $A$  et  $B$  d'effectifs respectifs  $n_A$  et  $n_B$  est calculé comme suit :

$$D(A; B) = \frac{1}{n_A \times n_B} \sum_{v_k \in A, v_{k'} \in B} d(v_k; v_{k'}) \quad (1)$$

Les dendrogrammes permettent de réaliser des regroupements en classes de véhicules similaires en définissant une distance de coupure. Une classe est représentée par sa moyenne et son écart-type. Les classes optimales sont déterminées par la condition limite suivante appliquée à un processus itératif :

- (C) Les erreurs relatives commises par la moyenne de la classe par rapport aux valeurs des indicateurs des véhicules qui constituent cette même classe, doivent être inférieures, en valeur absolue, à une valeur limite  $\varepsilon_{max}$  fixée à 10%, pour que la classe soit considérée comme fiable [15].

Pour chaque dendrogramme, le processus itératif démarre avec une distance de coupure telle que les véhicules sont regroupés en deux classes. Tant que la condition (C) n'est pas remplie sur chaque classe, la valeur de la distance de coupure est diminuée jusqu'à ce qu'une nouvelle classe soit créée. Une fois que le processus itératif est arrivé à son terme, la moyenne  $\mu$  et l'écart-type  $\sigma$  des erreurs relatives sont calculés sur l'ensemble des dendrogrammes du groupe auquel est appliqué ce processus itératif.

Un cas extrême apparaîtrait si les profils environnementaux des véhicules étaient si différents qu'il ne pourrait y avoir de regroupement ; dans ce cas nous obtiendrions autant de classes qu'il y a de véhicules et de dendrogrammes. Pour mesurer le potentiel de réduction, nous définissons l'indicateur du taux de réduction de classe  $\tau_r$  dans l'équation 2; nous attendons des valeurs de  $\tau_r$  supérieures à 50%.  $N_{max}$  est le nombre maximum de classes, et  $N_{opt}$  le nombre de classes optimales.

$$\tau_r = \frac{N_{max} - N_{opt}}{N_{max}} \quad (2)$$

### 3 Résultats

La figure 1 représente le dendrogramme du groupe (D4) sur l'indicateur GWP de la phase de fabrication. Deux itérations ont été nécessaires pour obtenir une erreur relative maximale, en valeur absolue, inférieure à 10%. Le processus itératif appliqué à ce dendrogramme aboutit donc à la création de 4 classes optimales.

Sur la figure 2 ont été représentés les taux de réduction pour chaque groupe de dendrogrammes en fonction des écart-types des erreurs relatives commises. Les groupes (D1) et (D3) obtiennent des taux de réduction inférieurs à 50%, conséquence d'un choix d'indice de dissimilarité calculé sur le cumul des indicateurs environnementaux. En revanche, au regard des valeurs de ces paramètres sur les groupes (D2) et (D4), considérer ou non le cumul des étapes du cycle de vie ne semble pas avoir de conséquences. Une analyse des classes optimales obtenues montre que dans le groupe (D2) l'étape d'utilisation est surreprésentée pour les indicateurs GWP, POCP, et EP, et l'étape de fabrication est surreprésentée pour l'indicateur ADP. Il est alors difficile de caractériser les classes.

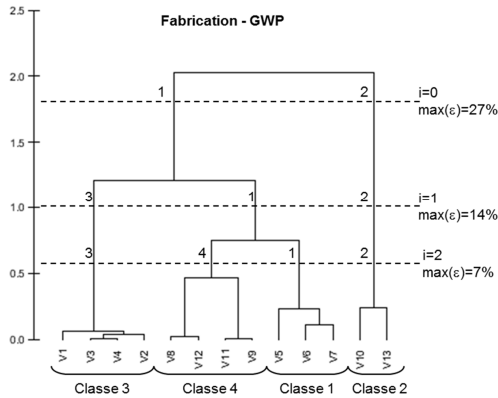


FIG. 1 – Dendrogramme du GWP sur l'étape de fabrication

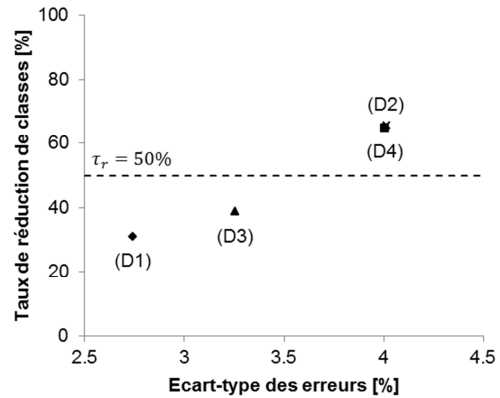


FIG. 2 - Taux de réduction de classes des 4 groupes de dendrogrammes en fonction des l'écart-types des erreurs relatives

En revanche, pour le groupe (D4), la caractérisation des classes optimales par les caractéristiques du tableau 1 est plus aisée. Le tableau 2 ci-dessous synthétise les classes obtenues pour chacun des dendrogrammes de (D4). On remarque que pour les étapes de fabrication et de fin de vie, les classes peuvent être caractérisées par le segment, la finition, la silhouette, et la chaîne de traction (conventionnelle ou hybride). La caractérisation des classes de l'étape d'utilisation, par contre, est plus difficile. Le GWP est directement lié à la consommation de carburant ; l'EP et le POCP dépendent des émissions de polluants spécifiques au moteur et au véhicule. Quant à l'ADP, sa valeur est directement liée à la quantité de plomb contenue dans la batterie qui est changée une fois sur le cycle de vie.

Etape	Critère	1	2	3	4	5	6	7	8
Fabrication	GWP	V5 V6 V7	V10 V13	V1 V2 V3 V4	V8 V9 V11 V12	-	-	-	-
	EP	V4	V10	V8	V11 V12	V3 V5 V6 V7	V9 V13	V1 V2	-
	POCP	V8 V9 V11 V12	V10 V13	V5 V6 V7	V1 V2 V3 V4	-	-	-	-
	ADP	V11 V12	V13	V9	V7	V8	V10	V1 V2	V3 V4 V5 V6
Utilisation	GWP	V1 V2 V3 V4 V10 V11 V13	V5 V6 V9	V7 V8 V12	-	-	-	-	-
	EP	V8 V12	V5 V6 V7 V9	V1 V2 V10 V11 V13	V3 V4	-	-	-	-
	POCP	V3 V9	V13	V4 V5 V7 V8 V11	V1 V2 V6	V10 V12	-	-	-
	ADP	V1 V2 V4 V5 V6 V7 V9	V3 V8 V10 V11 V12 V13	-	-	-	-	-	-
Fin de vie	GWP	V5 V6 V7	V9 V11 V12 V13	V8 V10	V2	V1 V3 V4	-	-	-
	EP	V7 V11 V12 V13	V9 V10	V2	V8	V1 V3 V4 V5 V6	-	-	-
	POCP	V7 V11 V12 V13	V9	V2	V8 V10	V1 V3 V4 V5 V6	-	-	-
	ADP	V5 V6 V7	V8 V9 V10 V11 V12 V13	V1 V2 V3 V4	-	-	-	-	

TAB. 2 – Synthèse des classes optimales des dendrogrammes de (D4)

### 4 Discussion

Par la comparaison des différentes manières de réaliser la CAH en fonction de la définition de l'indice de dissimilarité, nous avons montré que la prise en compte du cumul des indicateurs environnementaux (groupes (D1) et (D3)) ne permet pas un taux de réduction suffisant pour que la méthode soit efficace. Au contraire, il ne paraît pas y avoir de différences entre discrétiser ou non les étapes du cycle de vie (groupes (D2) et (D4)). La différence réside dans la caractérisation des classes obtenues. En effet, lorsque le cumul des étapes est utilisé dans le groupe (D2), la surreprésentation de l'une ou de l'autre étape engendre des classes non identifiables simplement par les caractéristiques de véhicules énumérées dans le tableau 1. En

revanche, le nombre de classes optimales est plus élevé dans le groupe (D4) ; mais il est facile de caractériser les classes obtenues.

Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les classes créées pour les indicateurs EP et POCP sur l'étape d'utilisation afin de les caractériser plus simplement qu'en donnant les valeurs des émissions de polluants. La piste envisagée est de clairement distinguer les étapes de *Well to Tank* (WtT) et de *Tank to Wheels* (TtW), et est guidée par les études de Koffler et Rohde-Brandenburger [16] et de Querini et al. [17]. La première établit la relation entre la masse d'un composant et son impact sur la consommation du véhicule ; seule la masse de l'innovation aura un impact sur le WtT. La seconde recommande de considérer un large panel de voiture pour obtenir une distribution de ces indicateurs ; seule une innovation dont la fonctionnalité est de réduire les émissions de polluants aura un impact sur le TtW.

Finalement, un MEV peut être défini par le renseignement de 5 caractéristiques du véhicule qu'il représentera : segment, finition, motorisation, silhouette, et consommation de carburant, permettant alors la sélection d'une classe par étape et par indicateur environnemental (soit 12 classes dans notre cas). Un MEV est alors constitué de 12 distributions de valeurs d'impacts pour 3 indicateurs environnementaux et 4 étapes du cycle de vie. A un MEV ainsi construit, une innovation est jointe afin d'évaluer l'impact de celle-ci sur le futur véhicule qui l'accueillera.

## 5 Conclusion et perspectives

La réalisation d'une ACV d'une automobile peut nécessiter de renseigner plus de 800 paramètres et durer 3 mois. L'approche présentée dans cet article simplifie l'évaluation environnementale d'un sous-système innovant en évitant d'évaluer le futur système complexe ou de paramétrer les ACV. Elle facilite ainsi l'initiation d'une méthode d'éco-conception dans l'entreprise.

Intégrée dans une entreprise qui produit une gamme de systèmes complexes, cette approche doit se doter du caractère évolutif de la modélisation environnementale d'un système complexe pour générer une dynamique d'apprentissage en éco-conception et ainsi éviter cette complexité paralysante induite par l'évaluation de nombreux composants/sous-systèmes selon de nombreuses catégories d'impacts. Les futures expérimentations porteront sur des Modèles environnementaux évolutifs de véhicules (MEEV) qui tiendront compte de l'ajout d'ACV à celles déjà disponibles. De même, dans le but de générer une spirale d'apprentissage de la dimension Environnement, le nombre d'étapes et d'indicateurs augmentera.

Enfin, grâce à un paramétrage des MEEV, il sera possible réaliser des simulations, par exemple sur la phase d'utilisation en se focalisant sur un roulage urbain ou extra-urbain, ou encore en générant plusieurs scénarios de fin de vie. Il sera également intéressant de modéliser les véhicules par périmètre de conception pour affiner la typologie des véhicules.

## Références

- [1] G. Finnveden, M. Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, S. Suh, Recent developments in Life Cycle Assessment, *J. Environ. Manage.*, 91, 1–21, 2009.
- [2] V. Oltra, M. Saint Jean, Sectoral systems of environmental innovation: an application to the French automotive industry, *Technol. Forecasting Social Change*, 76, 567–583, 2009.
- [3] T. E. Graedel, T. Lanzano, W. Pott, R. J. Araujo, *Multiscale Life-Cycle Assessment*. Yale School of Forestry & Environmental Studies, 2005.
- [4] G. A. Keoleian, K. Kar, Elucidating complex design and management tradeoffs through life cycle design: air intake manifold demonstration project, *J Clean Prod*, 11, 61–77, 2003.
- [5] M. Rio, T. Reyes, L. Roucoules, Toward proactive (eco)design process: modeling information transformations among designers activities, *J. Clean. Prod.*, 39, 105–116, 2013.
- [6] M. R. Bohm, K. R. Haapala, K. Poppa, R. B. Stone, I. Y. Tumer, Integrating Life Cycle Assessment Into the Conceptual Phase of Design Using a Design Repository, *J. Mech. Des.*, 132, 2010.
- [7] H. Ostad-Ahmad-Ghorabi, D. Collado-Ruiz, Tool for the environmental assessment of cranes based on parameterization, *Int J Life Cycle Assess*, 16, 392–400, 2011.
- [8] I. Sousa, D. Wallace, Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts, *Technol. Forecasting Social Change*, 73, 228–249, 2006.
- [9] M. Trela, J.-F. Omhover, A. Aoussat, Integration of EcoDesign in the early steps of the innovation process, *Int. J. Environ. Technol. Manage.*, 15, 154–168, 2012.

- 
- [10] H. Andriankaja, G. Bertoluci, D. Millet, Development and integration of a simplified environmental assessment tool based on an environmental categorisation per range of products, *J Eng Des*, 24, 1–24, 2013.
- [11] A. D. Curzons, C. Jiménez-González, A. L. Duncan, D. J. C. Constable, V. L. Cunningham, Fast life cycle assessment of synthetic chemistry (FLASC<sup>TM</sup>) tool, *Int J Life Cycle Assess*, 12, 272–280, 2007.
- [12] D. Collado-Ruiz, H. Ostad-Ahmad-Ghorabi, Comparing LCA results out of competing products: developing reference ranges from a product family approach, *J Clean Prod*, 18, 355–364, 2010.
- [13] T. Hastie, R. Tibshirani, J. J. H. Friedman, *The elements of statistical learning*, vol. 1. Springer New York, 2001.
- [14] L. Candillier, *Contextualisation, Visualisation et Evaluation en Apprentissage Non Supervisé*, Université Charles de Gaulle - Lille III, 2006.
- [15] A. Bala, M. Raugei, G. Benveniste, C. Gazulla, P. Fullana-i-Palmer, Simplified tools for global warming potential evaluation: when ‘good enough’ is best, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 15, 489–498, 2010.
- [16] C. Koffler, K. Rohde-Brandenburger, On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments, *Int J Life Cycle Assess*, 15, 128–135, 2009.
- [17] F. Querini, J.-C. Béziat, S. Morel, V. Boch, P. Rousseaux, Life cycle assessment of automotive fuels: critical analysis and recommendations on the emissions inventory in the tank to wheels stage, *Int J Life Cycle Assess*, 16, 454–464, 2011.