



HAL
open science

Eco-matériaux : les enjeux et les problématiques pour la mécanique

Estelle Bretagne

► **To cite this version:**

Estelle Bretagne. Eco-matériaux : les enjeux et les problématiques pour la mécanique. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390828

HAL Id: hal-03390828

<https://hal.science/hal-03390828>

Submitted on 21 Oct 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.

Eco-matériaux : les enjeux et les problématiques pour la mécanique

E.BRETAGNE

Université de Picardie Jules Verne, Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI, EA 3899), équipe IMaP, IUT de l'Aisne, 15 avenue F. Mitterrand, F-02880 Cuffies, estelle.molines@u-picardie.fr

Résumé :

Les questions d'environnement envahissent le champ médiatique de nos sociétés. Dans ce contexte, les matériaux ont des spécificités. En 1992 K. Halada a défini les éco-matériaux comme des matériaux contribuant à la réduction de l'impact environnemental lié aux activités humaines. Cela recouvre des matériaux, usuels ou innovants, ainsi que des utilisations variées. Nous mettons en lumière les enjeux et les problématiques, parfois méconnus, liés aux éco-matériaux et qui concernent la mécanique.

Abstract :

The media coverage of environment's subject gets into everything in our societies. Within this context, materials exhibit specific characteristics. In 1992 the concept of ecomaterials was proposed by Halada. Ecomaterials are materials which facilitate reduction of environmental impact due to human activities. It covers usual and innovative materials and various usages as well. We bring out sometimes unknown stakes and problematics that are linked to ecomaterials and concern mechanics.

Mots clefs : éco-conception, éco-matériaux, mécanique

1 Introduction

Les questions d'environnement envahissent depuis quelques années les préoccupations et le champ médiatique de nos sociétés. Des pays émergents comme la Chine [1, 2] prennent à bras le corps les problématiques environnementales liées à leur développement économique, tandis que d'autres pays, comme le Japon [3], ont déjà des années de réflexion en la matière. Et la crise financière récente vient encore compliquer la donne [4, 5, 6]. Le développement durable a été défini comme un développement qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [7]. C'est un concept vague et abstrait. Nous nous intéresserons ici à la dimension environnementale du développement durable mais cette notion recouvre également des aspects économique et sociaux. Ce n'est pas un hasard si le ministère créé en 2007 s'intitule Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables et cela souligne l'implication des collectivités locales.

D'un point de vue scientifique, le développement durable englobe plusieurs domaines : économie, droit, sciences sociales, sciences et techniques, chimie (chimie verte), biologie, ... et on voit même l'émergence de nouvelles disciplines telles que l'économie écologique [8]. En France, le programme PRECODD (Programme de recherche ECOTEchnologie et Développement Durable) vise à dynamiser la recherche française dans le domaine des éco-technologies.

Les nanotechnologies constituent une avancée scientifique particulièrement représentative des préoccupations actuelles : une commission européenne a été organisée en 2006 afin d'examiner les impacts des nanotechnologies sur l'environnement [9]. Comme l'expliquent Rickerby et al. [10], les retombées potentielles des nanotechnologies sur l'environnement peuvent, en l'état actuel de nos connaissances, être à la fois positives et négatives. En effet les nanotechnologies peuvent fournir des solutions pour certains problèmes environnementaux parmi lesquels la prévention des pollutions dues aux émissions industrielles avec le développement des nanocatalyses d'oxydes métalliques et la mise au point de systèmes de détection plus sensibles pour l'enregistrement des qualités de l'air ou de l'eau. Mais, dans certains cas, il a été montré que la composition chimique, la taille et la forme de nanoparticules peuvent provoquer des effets toxiques.

Dans ce contexte, les scientifiques ont un rôle à jouer en apportant des solutions technologiques économiquement viables répondant aux critères du développement durable. Pour les « mécaniciens », l'objectif est d'identifier de nouvelles problématiques auxquelles ils pourront apporter des réponses. Dans cet article je présente la spécificité des produits manufacturés : de cet exposé découle naturellement les notions d'éco-conception et d'éco-matériaux. Ensuite la place de la mécanique dans le domaine des éco-matériaux est discutée.

2 Spécificité des produits manufacturés

2.1 Cycle de vie et impacts environnementaux

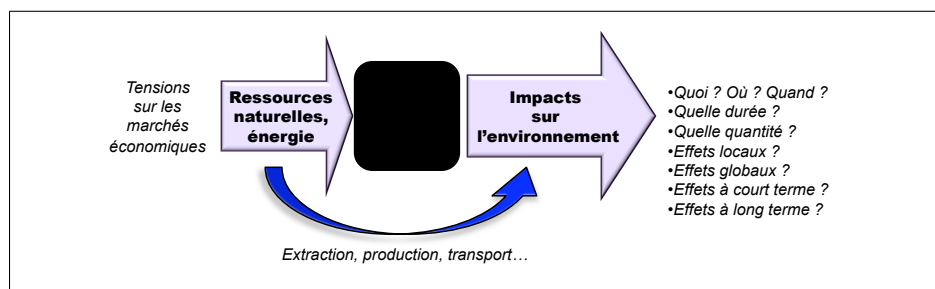


FIG. 1 – Fabrication et utilisation d'un produit manufacturé vues comme une boîte noire.

Considérons la fabrication et l'utilisation d'un produit manufacturé comme une boîte noire (figure 1). En entrée, nous avons des ressources naturelles et de l'énergie tandis qu'en sortie nous avons divers impacts environnementaux.

Les prix des ressources naturelles et de l'énergie subissent une hausse liée, soit à la raréfaction des ressources non-renouvelables, soit à la hausse du prix du transport (due directement ou indirectement à la hausse du prix du pétrole). Cela entraîne une hausse du prix de certaines matières premières et une tension sur les marchés économiques.

En sortie nous obtenons des impacts environnementaux divers dus, par exemple, aux procédés de fabrication, au conditionnement, au transport, à l'utilisation, à la maintenance... Ces impacts peuvent être infinitésimaux ou importants, ponctuels ou prolongés. Leurs effets dépendent également de l'échelle spatiale considérée (effets locaux et/ou globaux). Les déchets constituent l'impact environnemental le plus visible. Leur incinération peut s'accompagner d'une valorisation énergétique sous forme de chaleur ; d'autres alternatives sont le stockage ou l'enfouissement. Malheureusement les déchets sont de plus en plus taxés, leur incinération pose parfois des problèmes environnementaux (émission toxiques...) et leur stockage s'avère difficile (manque de place, législation...), coûteux ou dangereux.

Le cycle de vie des produits manufacturés est détaillé sur la figure 2 [11]. A chaque étape, des impacts envi-

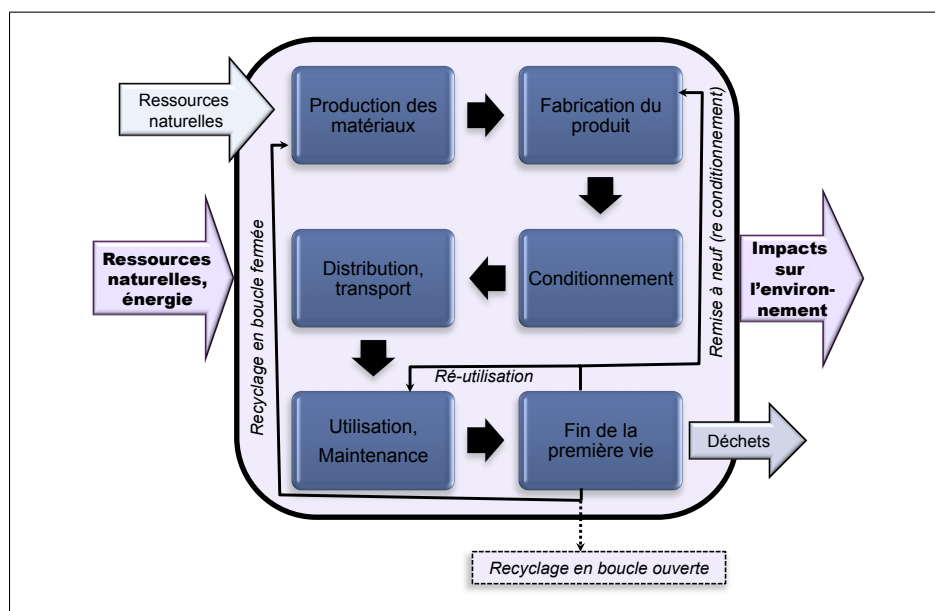


FIG. 2 – Cycle de vie d'un produit manufacturé.

ronnements sont générés. En fin de vie, le produit est considéré comme un « déchet ». Plusieurs alternatives au stockage, à l'enfouissement ou à la valorisation énergétique existent : le recyclage (en boucle ouverte ou fermée), la réutilisation des produits manufacturés et le reconditionnement (remise à neuf). On définit les matières premières secondaires comme des matières ayant déjà été incorporées au moins une fois à un produit : elles n'ont pas forcément les mêmes propriétés physiques que les matières premières initiales. C'est par exemple le cas des polymères styréniques.

2.2 Enjeux économiques

L'imposition de normes environnementales (françaises ou européennes) a eu pour effet l'augmentation de la responsabilité des fabricants [11] : le respect et/ou le non-respect des normes a un coût économique. Ces normes liées à l'hygiène, la sécurité et l'environnement peuvent concerner aussi bien la chaîne de production elle-même (par exemple le contrôle et/ou la diminution des émissions, la prise en charge des déchets liés à la production...) que la qualité des produits (procédés de fabrication plus chers, mise en place de démarches qualité plus draconiennes,...).

Les premières réglementations ont concerné les emballages (directive européenne du 20/12/1994 traduit par le décret n° 98-638 du 20/07/1998) : prévention par la réduction à la source, minimisation des substances dangereuses, aptitude à la valorisation et à la réutilisation [12]. Depuis ont suivi des réglementations concernant la construction automobile, les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE) etc. Depuis 2006, le Code des Marchés Publics intègre des critères de sélection liés au développement durable [12].

Des entreprises imposent par ailleurs des conditions draconiennes à leurs prestataires. Dans certains domaines, comme l'habitat et l'automobile, la pression économique et concurrentielle est très forte [12] : l'habitat écologique et la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale) ont le vent en poupe [13], la réduction de la consommation et des émissions toxiques sont désormais des arguments de vente d'une voiture [14].

Au niveau de la fabrication, l'augmentation des prix rend nécessaire la diminution des coûts énergétique et l'amélioration du rendement des matières premières (notion d'éco-efficacité). Encore trop rares, les symbioses industrielles se multiplient. Il s'agit d'un système d'échange d'énergie ou de sous-produits entre plusieurs entreprises [15]. L'évolution de l'économie entraîne une tertiarisation et une dématérialisation : la vente d'un produit est remplacée par la fourniture d'un service [15]. Dans ce contexte, une petite amélioration du produit représente un gain non négligeable pour l'entreprise qui gère un parc entier (par exemple de photocopieuses).

Cette synthèse rapide et simplifiée permet d'appréhender les spécificités du développement durable pour les produits manufacturés. Néanmoins la situation est loin d'être simple. L'amélioration, en terme d'impacts environnementaux, d'une phase de vie d'un produit peut, en contre partie, dégrader une autre phase. Par exemple comment juger de la pertinence d'un recyclage dont le coût énergétique est très important ? La notion d'éco-conception est une tentative de réponse à ces questions complexes.

2.3 Eco-conception

L'éco-conception est un concept international développé par le « World Business Council for Sustainable Development » lors du sommet de Rio de 1992. Il s'agit d'intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, en s'appuyant sur une approche globale et multicritère des impacts sur l'environnement, ainsi que sur la prise en compte de toutes les étapes de vie des produits. Cette démarche peut s'accompagner d'un système de management environnemental (SME) au sein de l'entreprise.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'un des outils utilisés en éco-conception, même si l'estimation de l'impact environnemental reste difficile. Pour un produit courant, il faut établir, pour chaque phase de la vie, le coût en terme de ressources (matières premières, énergie), l'inventaire des émissions et l'estimation de l'impact sur l'environnement. Cela requiert des bases de données sur les matériaux et les procédés de fabrication, autrement dit des données nombreuses, parfois difficiles à obtenir. Cela s'avère coûteux en temps et en argent. D'où la nécessité de mettre au point des éco-indicateurs pertinents et utilisables dans la pratique [16, 17]. L'ACV est surtout utilisée pour comparer des solutions technologiques entre elles. Elle est seulement appliquée à quelques composants du produit complet et se limite le plus souvent à quelques critères environnementaux et/ou à certaines phases de vie du produit [12, 14, 15, 19].

Prenons l'exemple de l'aluminium : l'industrie européenne de l'aluminium par le biais de l'EEA (European Aluminium Association) a initié un programme de développement durable en 2001. La première étape a consisté à mettre au point un ensemble d'indicateurs de développement durable [18].

Le choix des matériaux est crucial ; la prise en compte de l'impact environnemental au travers d'indicateurs pertinents requiert l'utilisation de méthodes d'optimisation multicritères [16, 20]. Le projet « Eco Composite » (2005) financé par l'Agence Nationale de la Recherche et PRECODD traite de la mise au point et de la validation d'une méthodologie inverse d'éco-conception de polymères à renforts lignocellulosique en vue d'optimiser leurs performances techniques et environnementales. Cette étude multidisciplinaire coordonnée par P. Castéra (Université Bordeaux 1, INRA, UMR 5103 Unité Sciences du Bois et des Biopolymères) se fonde sur une fonction numérique pondérée par différents critères. Son utilisation permet de trouver un compromis entre les performances du matériau, le coût de fabrication et l'impact environnemental estimé à partir d'une analyse de cycle de vie.

3 Eco-matériaux

Le terme d'éco-matériaux est défini dans une publication de Kohmei Halada en 1992 [21] et cette notion prend tout son sens dans le contexte de développement durable et d'éco-conception.

De manière générale, il s'agit de matériaux qui contribuent à la réduction de l'impact environnemental lié aux activités humaines. Halada, pionnier en la matière, classe les éco-matériaux en 4 grandes catégories [22] :

- **Les matériaux contenant moins de substances dangereuses**
Il va s'agir par exemple de matériaux sans plomb, sans gaz halogènes (retardateur de feu, substitut du PVC...), sans mercure, de matériaux semi-conducteurs moins dangereux pour l'environnement...
- **Les matériaux avec un meilleur profil environnemental**
Cette catégorie inclut :
 - des matériaux issus de ressources renouvelables [23, 24, 25] : matériaux à base de plantes, de bois, bioplastiques (bio-polymères), ...
 - des matériaux obtenus à partir de déchets : ciments obtenus à partir de déchets municipaux ou de cendres (résidus de combustion), bétons légers contenant des granulats de caoutchouc (granulation de pneus usagés [26, 27, 28, 29]), bétons légers contenant des granulats de plastique (broyats de PET et PEHD obtenus mécaniquement à partir de bouteilles plastiques [30]), ...
 - des matériaux issus de procédés de fabrication ayant moins d'impacts sur l'environnement...
- **Les matériaux avec un potentiel de recyclage plus important**
On peut citer les aciers recyclables, des matériaux composites recyclables (composites décomposables, composites de la même famille de matériaux), des aciers avec peu d'impuretés...
- **Les matériaux présentant un rendement supérieur par rapport aux ressources utilisées**

Les produits d'origine végétale sont très présents : le pôle de compétitivité à vocation mondiale intitulé Industrie et Agro-ressources y est même consacré. Il s'agit de valoriser des agro-ressources non alimentaires parmi lesquels des déchets agricoles et agro-alimentaires.

La définition des éco-matériaux peut encore être étendue aux matériaux qui entrent dans la fabrication de systèmes de contrôle et/ou de traitement de la pollution, de procédés de traitement et/ou de recyclage et de procédés de fabrication plus respectueux de l'environnement. L'amélioration du taux de recyclage des gisements de matières plastiques, pour lesquelles le tri automatique est difficile, peut entrer dans cette catégorie. Enfin, comme le soulignent Yagi et Halada [31] nous allons utiliser les matériaux mieux et plus longtemps, ce qui implique de re-penser la « science des matériaux » dans le cadre de l'éco-conception et des éco-matériaux. L'approche de ces auteurs est par ailleurs intéressante puisqu'ils lient les notions d'environnement et de gestion des risques, une dimension souvent oubliée lorsqu'on parle de développement durable [31].

4 Problématiques pour la mécanique

4.1 Matériaux innovants

Comme on l'a vu précédemment, les éco-matériaux peuvent être des matériaux innovants ou des combinaisons de matériaux encore peu étudiées. Ce sont souvent des matériaux composites : les fibres peuvent être des fibres végétales, les granulats des résidus de déchets... Le cas des bio-polymères et des matériaux composites biodégradables [32] est intéressant au vue des perspectives futures. De plus, dans l'optique de l'éco-conception, les procédés de fabrication deviennent un point clé dans l'étude des matériaux : l'influence des traitements subis est passé à la loupe [33].

Pour les matériaux issus de ressources végétales, la collaboration avec des biologistes, agronomes, chimistes... est obligatoire. Par ailleurs les propriétés intrinsèques des matières d'origine végétales obligent à reconsidérer la notion de matériau. Prenons l'exemple des fibres végétales [25]. Si les propriétés mécaniques sont variables dans le temps et/ou hétérogènes, quelles sont les grandeurs physiques représentatives et pertinentes ? Comment modéliser le comportement mécanique ? Comment utiliser le matériau dans des applications industrielles ? Le problème est similaire avec des matières recyclées. Les approches probabilistes sont, dans ce cadre, une piste à explorer.

Les nanotechnologies sont également un domaine de recherche incontournable, bien qu'encore mal connu des mécaniciens : le CNRS a mis en place en 2008 un groupe de recherche (GDR CNRS 1380 MECANO) dont l'objectif affiché est le développement (*sic*) d'une approche pluridisciplinaire sur la « mécanique des nano-objets » auprès de physiciens, mécaniciens et chimistes.

Dans le bâtiment, l'utilisation de ressources locales (végétales, minérales, issues de recyclage...) est privilégiée. Les géopolymères apparaissent comme une alternative au ciment avec un impact environnemental moindre [34]. De manière générale, il faut trouver un compromis entre le caractère « durable », les propriétés thermiques, hydriques, acoustiques et mécaniques, tout en veillant à ce que la pose soit facile. Cela nécessite une certaine pluridisciplinarité et un dialogue avec tous les acteurs de la filière, du fournisseur de matières premières jusqu'aux assurances.

Dans le secteur automobile, il faut diminuer la consommation énergétique et les émissions polluantes tout en assurant la sécurité des passagers et la recyclabilité des véhicules en fin de vie [35] : ces objectifs, parfois contradictoires, doivent être atteints avec des technologies économiquement viables. Comme dans l'aéronautisme, l'allègement des structures est crucial. Ce domaine d'application constitue un défi scientifique passionnant. L'étude du comportement mécanique des éco-matériaux est du domaine de la mécanique. L'originalité vient du fait que le mécanicien peut intervenir dès la phase d'élaboration du matériau afin d'apporter son expertise technique à des industriels et/ou à des chercheurs issus d'autres disciplines (chimie, physique, biologie, agriculture, économie, génie civil, génie des procédés...). Cela requiert des compétences pluridisciplinaires.

4.2 Nouveaux usages

Nous allons devoir utiliser les matériaux mieux et plus longtemps [31]; cela nécessite des compétences en optimisation de forme, calcul et dimensionnement de structures, sollicitations complexes et/ou sévères, comportement mécanique en fatigue, mécanique de l'endommagement, mécanique des matériaux hétérogènes, approches multi-échelles, couplages multiphysiques afin de prendre en compte les conditions extérieures auxquelles seront plus sensibles les matériaux biodégradables. Il s'agit clairement de problématiques du domaine de la mécanique. Les modèles mécaniques pourront être couplés pour prendre en compte la phase de biodégradabilité, comme dans l'article [36] concernant des tas de déchets.

De nouvelles pistes de recherche s'ouvrent également pour les matériaux classiques [17, 37] : l'amélioration des procédés de fabrication et de recyclage, la ré-utilisation, le désassemblage, l'utilisation de matière recyclée (et donc parfois dégradée), l'élaboration de procédés de dépollution...

Bahlouli et al. [38] ont par exemple travaillé sur le comportement mécanique avant et après recyclage de composites à base propylène utilisés dans l'automobile. Bourmaud et al. [39, 40] ont étudié le recyclage de composites à base polypropylène incorporant des fibres végétales. Enfin des travaux récents sur les traitements de surface [41, 42] montrent comment les notions d'éco-matériaux et d'éco-conception peuvent être pris en compte en tribologie.

5 Conclusion

Les problématiques liées aux éco-matériaux sont multi-physiques et multi-critères, par essence pluridisciplinaires. Les matériaux à base de ressources végétales et les nanotechnologies sont les exemples les plus évidents de la nécessité d'une collaboration pluridisciplinaire, de la conception jusqu'à la fin de vie des produits. Et cette nécessité dépasse largement le cadre de ces seuls matériaux.

Les enjeux environnementaux, donc politiques et économiques, nous incitent à reconsidérer toute la science des matériaux sous un nouvel angle; la compréhension du comportement mécanique est un point crucial dont l'importance va aller grandissante. Dans ce contexte, les mécaniciens ont de nombreux défis à relever, mais cela ne se fera pas sans une dose, même légère, de pluridisciplinarité.

Références

- [1] Nie Z. et Zuo T., Ecomaterials research and development activities in China, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 7, p. 217-223, 2003.
- [2] Pedroletti B., En Chine, la « révolution verte » pourrait profiter du plan de relance, *Le Monde*, édition du 17/02/09.
- [3] Mesmer P., Sortie de crise : le Japon mise sur l'environnement, *Le Monde*, édition du 21/02/09.
- [4] Bozonnet J.-J., En Espagne, la fin du mirage écologique, *Le Monde*, édition du 20/02/09.
- [5] de Vergès M., En Allemagne, la prime à la casse fait des heureux, mais l'écologie reste marginale dans le plan de relance, *Le Monde*, édition du 18/02/09.
- [6] Malingre V., Au Royaume-Uni, le sauvetage des banques passe avant le développement durable, *Le Monde*, édition du 22/02/09.
- [7] U.N., *Our Common Future*, World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, 1987, p. 43.
- [8] Ropke I., Trends in the development of ecological economics from the late 1980s to the early 2000s, *Ecological Economics*, 55, p. 262-290, 2005.
- [9] Morrisson M., Nano and the environment workshop report, Nanoforum, Brussels, 2006, <http://nanoforum.org>
- [10] Rickerby D. et Morrisson M., Nanotechnology and the environment : a european perspective, *Science and Technology of Advanced Materials*, 8, p. 19-24, 2007.
- [11] Ashby M., Eco-design using the Cambridge Engineering Selector, Cambridge University, UK, The 8th International Conference of Eco-Materials (ICEM8), présentation orale (session plénière), 9 juillet 2007.
- [12] Bellini B., Le développement de démarche d'écoconception : au delà d'un impératif réglementaire, un enjeu concurrentiel, *Qualitique*, novembre 2007, n° 192, p. 29-35.
- [13] Gobin C., Le développement durable en BTP-Optimisation des ressources par la R&D, *Techniques de l'Ingénieur*, dossier C3056, parution février 2006, base Bâtiment et travaux neufs.
- [14] Devalan P., Ecoconception des composants mécaniques, *Techniques de l'Ingénieur*, dossier BM5009, parution octobre 2007, base Fonctions et composants mécaniques.
- [15] Dupraz-Lagarde S. et Poimboeuf H., Développement durable : implications pour l'industrie, *Techniques de l'Ingénieur*, dossier G200, parution juillet 2004, base Environnement.
- [16] Rydh C.J. et Sun M., Life cycle inventory data for materials grouped according to environmental and material properties, *Journal of Cleaner Production*, 13, p. 1258-1268, 2005.

- [17] Tiruta-Barna L., Benetto E. et Perrodin Y., Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies : review and critical analysis of approaches and applications, *Ressources, Conservation and Recycling*, 50, p. 351-379, 2007.
- [18] Nordheim E. et Barasso G., Sustainable development indicator of the european aluminium industry, *Journal of Cleaner Production*, 13, p. 1258-1268, 2005.
- [19] L'éco-conception pour les mécaniciens, comment concilier conception et environnement pour un développement durable, Cetim, 2004.
- [20] Ashby M., Multi-objective optimization in material design and selection, *Acta mater.*, 48, 2000, p. 359-369.
- [21] Halada K., Ecomaterials, *Bull Jpn Inst Metals*, 1992, 31, p. 505-512.
- [22] Halada K., Progress of ecomaterials toward a sustainable society, *Current opinion in solid state and materials science*, 7, 2003, p. 209-216.
- [23] Baley C., Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase, *Composites : Part A*, 33, 2002, p. 939-948.
- [24] Bodros E., Pillin I., Montrelay N. et Baley C., Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications ?, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, p. 462-470.
- [25] Dupré B., Contribution à la valorisation des coproduits du lin : Etude de l'impact du vécu et de la variabilité génétique sur les propriétés des composites élaborés, thèse de l'Université de Picardie Jules Verne, Amiens, Mai 2005.
- [26] Benazzouk A., Mezreb K., Doyen G., Goullieux A. et Quéneudec M., Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 25, 2003, p. 711-720.
- [27] Benazzouk A., Mezreb K., Douzane O. et Quéneudec M., Physico-mechanical properties of aerated composites containing shredding rubber waste, *Cement and Concrete Composites*, 28, 2006, p. 650-657.
- [28] Bonnet S., Matériaux cimentaires à haute déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés. Thèse de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse 2004.
- [29] Turki M., Bretagne E., Rouis M.J. et Quéneudec M., Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures, *Construction and Building Materials*, sous presse, disponible en ligne depuis le 21/01/09.
- [30] Yazoghli O., Contribution à la valorisation des emballages alimentaires de post-consommation en polyéthylène téréphtalate et en polyéthylène haute densité. Etude de la faisabilité et évaluation des performances physico mécaniques, hydriques et thermiques, thèse de l'U.P.J.V., Amiens, octobre 2005.
- [31] Yagi K. et Halada K., Materials development for a sustainable society, *Materials and Design*, 22, p. 143-146, 2001.
- [32] Baley C., Grohens Y. et Pillin I., Etat de l'art sur les matériaux composites biodégradables, *Revue des composites et matériaux avancés*, 14, 2004, p. 135-166.
- [33] Le Troedec M., Sedan D., Peyratout C., Smith A., Bonnet J.-P., Guinebretiere R., Gloaguen V. et Krausz P., Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres, *Composites : Part A*, 39, 2008, p. 514-522.
- [34] Duxson P., Provis J. L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J., The role of inorganic polymer technology in the development of « green concrete », *Cement and Concrete Research*, 37, 2007, p. 1590-1597.
- [35] Gilliéron P. et Levallois-Goy E., Contribution de l'aérodynamique au développement durable et sécuritaire dans l'automobile, *Mécanique et Industries*, 6, p. 567-574, 2006.
- [36] McDougall J., A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste, *Computers and Geotechnics*, 34, p. 229-246, 2007.
- [37] Chen C.-C., Development of a framework for sustainable uses of resources : more paper or less plastics ?, *Environment international*, 32, 2006, p. 478-486.
- [38] Bahlouli N., Pessey D., Ahzi S. et Rémond Y., Mechanical behavior of composite based polypropylene : Recycling and strain rate effects, *J. Phys. IV* 134, 2006, p. 1319-1323.
- [39] Bourmaud A. et Baley C., Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 92, Issue 6, Juin 2007, page 1034-1045.
- [40] Bourmaud A. et Baley C., Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 94, Issue 3, Mars 2009, p. 297-305.
- [41] Serres N., Hlawka F., Cornet A., Costil S., Langlade C. et Machi F., L'analyse de cycle de vie, source d'innovation dans le choix des traitements de surfaces, Acte du congrès A3TS, 11-13 juin 2008, Tours.
- [42] Serres N., Hlawka F., Cornet A., Costil S., Langlade C. et Machi F., Revêtements par voie sèche alternatifs au chrome (VI) : comment concilier tribologie et développement durable, Acte des Journées Francophones de Tribologie, 20-22 mai 2008, Lyon.