



HAL
open science

La conception durable (Partie II) : Applications industrielles

Bernard Yannou, Gwenola Bertoluci, Yann Leroy, Asma Ghaffari, François Cluzel

► **To cite this version:**

Bernard Yannou, Gwenola Bertoluci, Yann Leroy, Asma Ghaffari, François Cluzel. La conception durable (Partie II) : Applications industrielles. Centraliens, 2011, 611, pp.30-35. hal-00850654

HAL Id: hal-00850654

<https://hal.science/hal-00850654>

Submitted on 7 Aug 2013

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.

La conception durable (Partie II) : Applications industrielles

Cet article est la suite de « *La conception durable (Partie I) : enjeux et outils* » paru dans le dernier numéro de Centraliens. Trois applications concrètes de recherches appliquées menées en conception durable au sein du Laboratoire Génie Industriel de Centrale y sont détaillées.

Eco-Concevoir une usine ou un système complexe : les alumineries

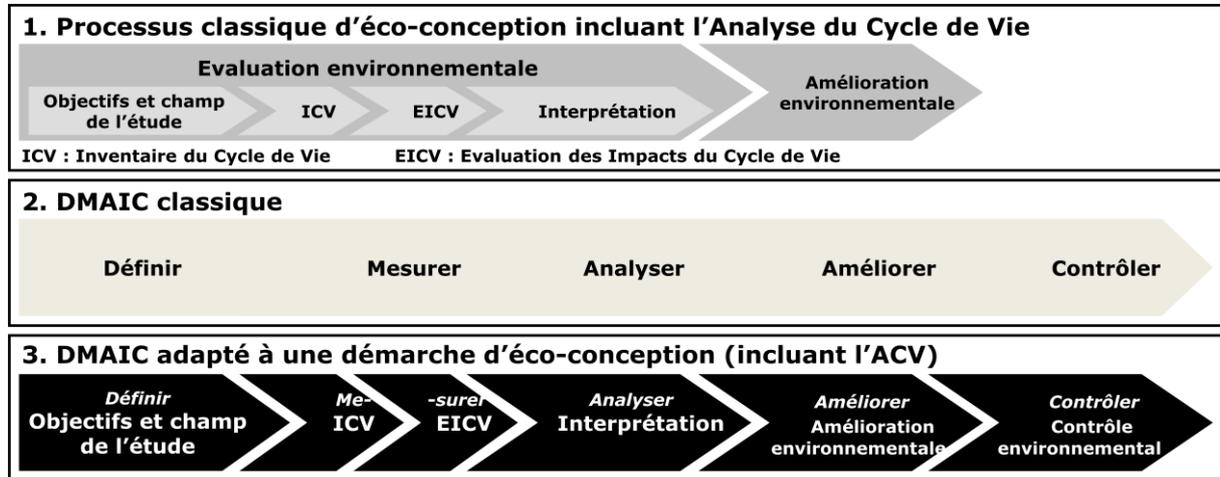
Eco-concevoir un système complexe comme une usine fait l'objet de recherches au LGI. Le doctorant François CLUZEL est intégré au sein de l'unité **PEM (Power Electronics Massy) d'ALSTOM GRID** qui conçoit, assemble et commercialise des **sous-stations électriques**, qui permettent de convertir l'énergie en entrée des alumineries conçues et exploitées par d'autres industriels (comme **Rio Tinto Alcan ou Alcoa**). A noter que ces usines de production d'aluminium à partir d'alumine sont parmi les usines les plus émettrices de gaz à effet de serre au monde car, outre des rejets importants dus au processus d'électrolyse, la consommation électrique des plus récentes d'entre elles peut atteindre celle d'une ville comme Marseille (> 1 GW). La demande d'ALSTOM GRID est claire : **comment s'y prendre pour éco-concevoir un système complexe comme une sous-station** (3000 tonnes de matière hors génie civil et plusieurs milliers de composants référencés) ? De plus, **comment ensuite en faire un argument commercial pour l'ensemblier qui a sa propre politique de développement durable ?**



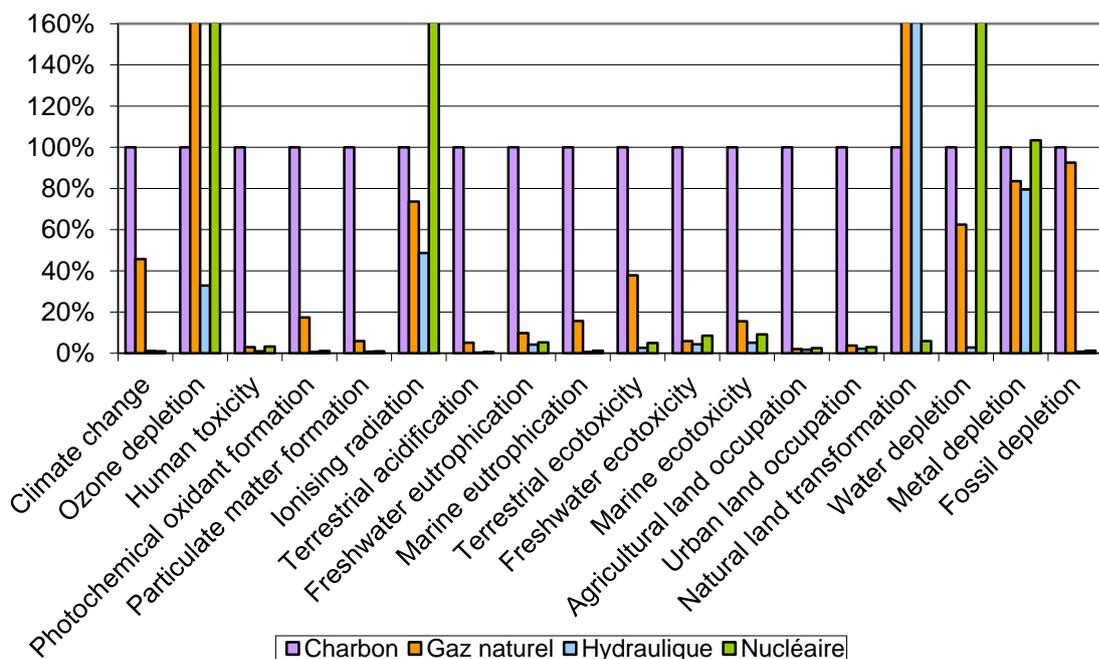
Ces deux questions ont été abordées sous les angles de la modélisation et de la simulation des systèmes complexes, et des processus organisationnels des entreprises. Deux principaux livrables de thèse sont en cours de développement et d'expérimentation chez ALSTOM GRID.

Le premier livrable, d'ordre organisationnel, consiste à savoir comment intégrer profondément les pratiques d'éco-conception et s'organiser, en avance de projet, pour éco-concevoir son système du premier coup. L'approche **Lean Six Sigma** est utilisée pour enrichir les processus normalisés

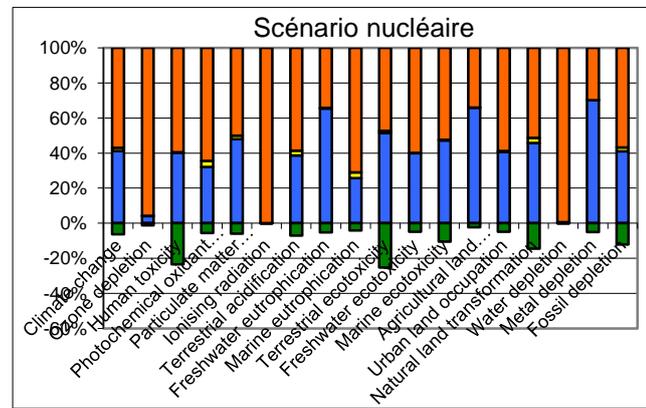
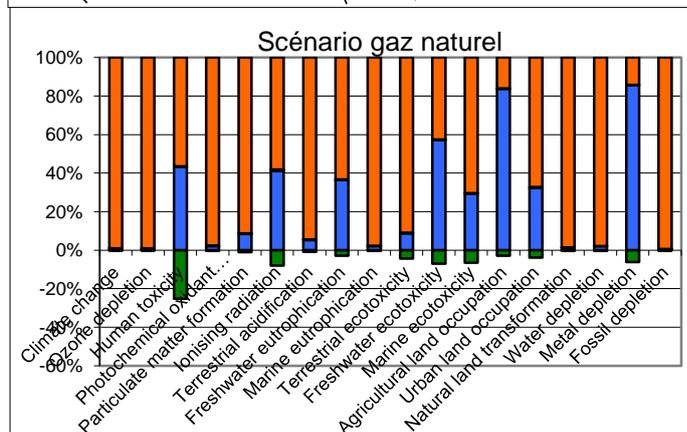
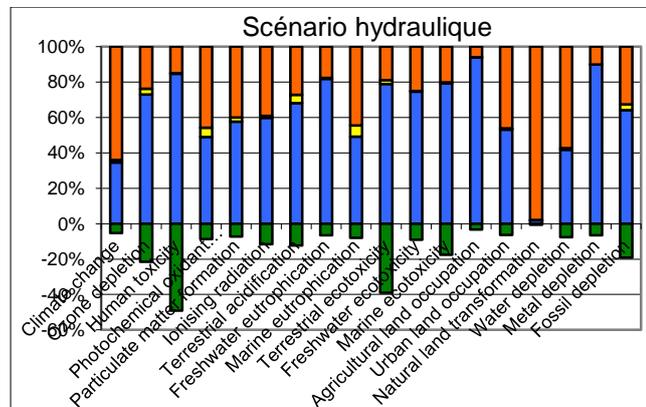
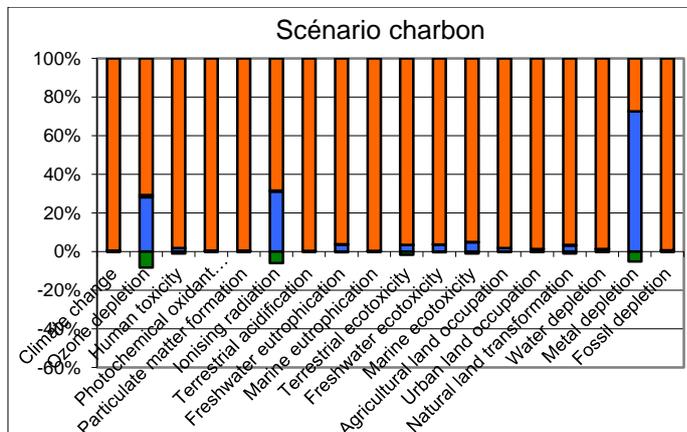
d'Analyse de Cycle de Vie [ISO 14040], mal adaptés aux systèmes complexes, et pour parvenir à déterminer les facteurs les plus influents qui impactent à la fois les performances environnementales mais aussi les coûts. Le processus classique d'éco-conception, incluant l'ACV, a ainsi été redéfini à partir du processus d'amélioration continue du 6 Sigma, à savoir le **DMAIC** (*Define, Measure, Analyse, Improve, Control*).



En réalité, nous avons scindé cette approche théorique en deux DMAIC distincts d'évaluation globale du système et d'amélioration environnementale de points précis. Le premier, déjà réalisé, a permis de mener l'inventaire des familles de solutions de sous-stations, d'effectuer des ACVs générales sur ces familles, d'en déduire les centres de coûts environnementaux, et par conséquent les facteurs de conception ou d'implantation les plus influents sur les impacts. Ce premier étage a été réalisé pour capitaliser en quelque sorte le savoir-faire environnemental des familles de sous-stations d'ALSTOM GRID. Ainsi, le résultat majeur est la grande dépendance du profil environnemental de la sous-station à l'origine de l'électricité (schéma montrant les 18 indicateurs environnementaux, en fonction de l'alimentation en électricité choisie par le client : *charbon, gaz, hydraulique, nucléaire*). En fonction de cette nature d'électricité, prévisible assez tôt dans le processus de conception, nous sommes en mesure d'imputer à la fois une phase de cycle de vie ou un sous-système fortement contributeurs à tel ou tel impact, qui sont autant de pistes à l'amélioration ultérieure de l'offre.



Dans la partie *Improve*, nous lançons des sessions de créativité pour définir des nouvelles solutions localement (ex : remplacement d'un matériau et redimensionnement des conducteurs), que nous appelons « fiches variantes ». Ces fiches variantes sont analysées indépendamment en termes de performance nominale, coût, fiabilité, maintenance et impacts environnementaux par les décideurs. Les projets les plus prometteurs sont ensuite concrétisés dans la deuxième partie de la démarche.



■ Matériaux ■ Fin de vie ■ Transports ■ Exploitation

La deuxième partie de la démarche consiste ensuite à assurer un suivi des projets de R&D issus des fiches variantes du DMAIC. Il s'agit notamment de vérifier la validité des gains environnementaux obtenus (en effectuant localement un inventaire plus fouillé) et d'alimenter les ACV globales des différentes configurations de sous-station. Une fois ces différents projets menés à bien (sur plusieurs mois ou années) et dans une optique d'amélioration continue, l'entreprise est ainsi en mesure de réitérer la démarche entière en réactualisant l'inventaire initial des données.

Le second livrable de thèse consiste quant à lui à valoriser auprès des clients les résultats issus de la démarche précédente. Il s'agit d'identifier le meilleur compromis d'architecture de sous-station en termes notamment de coûts économiques, de fiabilité et d'impacts environnementaux. Pour chaque grande famille de sous-station, **un plan d'expériences** important a exploré les configurations possibles en termes des variables de puissance, d'implantation géographique et donc d'origine de l'électricité locale, et de quelques variables de choix de conception dimensionnant les principaux équipements. A partir d'un catalogue des solutions technologiques disponibles, un « configurateur » va donc identifier la configuration optimale en fonction des attentes des clients et du lieu d'implantation de la sous-station. **De cette manière, l'équipementier ALSTOM GRID est maintenant en mesure, tôt dans le processus de négociation d'affaires, d'argumenter sur les performances environnementales de ses sous-stations et la configuration vraisemblablement la plus adaptée à la localisation prévue de l'aluminerie.**

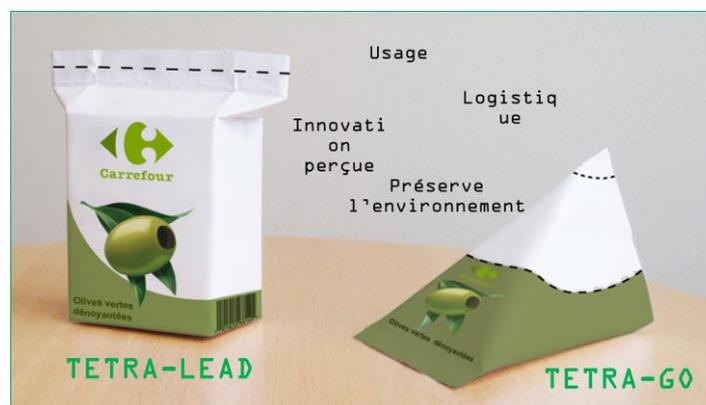
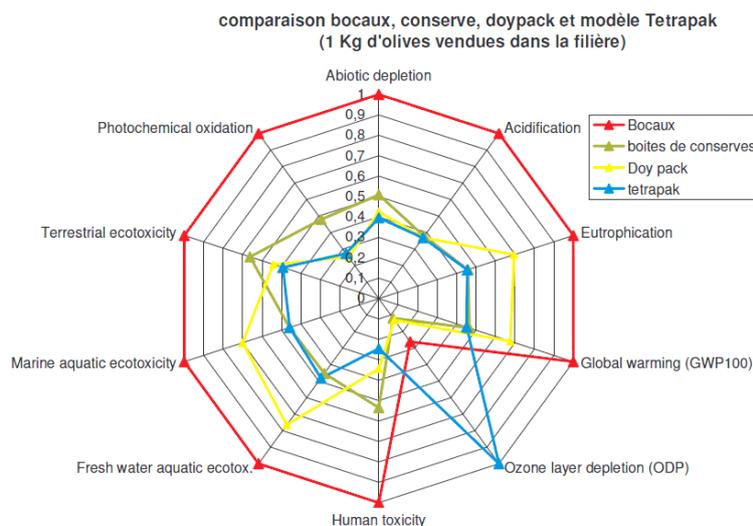
Eco-concevoir l'emballage : les olives

Nous travaillons également à des **modèles globaux d'éco-conception produit-emballage-logistique**, notamment dans le secteur de l'agro-alimentaire. En effet, prenons l'exemple des trois exemples d'emballages primaires des olives : la boîte de conserve, le bocal en verre et le DoyPack™ (film plastique souple polyéthylène).



Ces emballages primaires utilisent bien entendu des matériaux différents et une énergie de mise en œuvre différente. Mais ces emballages pèsent aussi des poids différents et présentent une concentration plus ou moins importante d'olives (rapport volume contenu utile sur volume contenant). Cette concentration et celle du remplissage de l'emballage secondaire (plus ou moins grand évitement de transport de vide) modifient la performance environnementale du transport et l'énergie dépensée utile par produit élémentaire. De plus, **le périmètre d'ACV à prendre en compte doit absolument être celui des trois emballages** : primaire, secondaire (ex : la boîte de carton) et tertiaire (ex : la palette et son blister). En effet, des allègements de certains emballages (ex : DoyPack™) nécessitent des renforcements des autres niveaux de l'emballage (ex : carton) ; il faut donc **éviter les transferts d'impacts** en pratiquant des approches globales de recherche de solutions.

Enfin, l'**usage** qu'on fait des olives est primordial pour savoir quel emballage est le plus « éco ». Si c'est pour un usage familial, tout dépendra de sa vitesse de consommation et de l'**aptitude de l'emballage à conserver les olives après ouverture** (la boîte de conserve et le DoyPack peuvent être problématiques). Pour des consommations massives et immédiates (restaurants d'entreprise), la boîte de conserve, qui se recycle, est la meilleure solution. Des élèves de 3^{ème} année Centrale ont éco-innové sur de nouvelles formes d'éco-emballages¹ d'olives en démontrant qu'en considérant une distribution des quantités de consommation et taux de perte des olives dans les familles françaises, on pouvait aboutir à des profils environnementaux (production d'olives, emballage primaire/secondaire/tertiaire, transports, fin de vie) nettement moins impactant qu'aucun des trois emballages existants pour la plupart des impacts considérés.



Eco-concevoir une filière de recyclage et une logistique industrielle : le verre

Nous développons au travers du projet VALVER² (labellisé par le pôle de compétitivité MOV'EO et financé par l'ADEME et les régions IDF et Haute-Normandie) des **modèles de conception de filières de recyclage**.

¹ Les références aux marques Carrefour™ et TetraPak™ ne sont que des « mises en scène » issues des projets élèves et n'engagent en rien les marques en question.

² <http://www.pole-moveo.org/pdf-projets-das/Valver-F.pdf> et <http://www.prorecyclage.com/valver/partenaires.html>

A l'heure actuelle, la France se retrouve avec 48 400 tonnes de verres automobiles (pare-brises, vitres latérales et lunettes arrières) en fin de vie : 32 400 tonnes viennent des VHU (Véhicules Hors d'Usage) et sont... enfouies dans le sol, alors que 16 000 tonnes viennent du marché de remplacement et sont envoyées pour 2/3 en Italie et 1/3 en Belgique pour être recyclées en laine de verre (le moins noble) et du verre de bouteille (moyennement noble). De plus, la France regorge de stocks de verres automobiles à recycler, sans moyens industriels pour le faire, contrairement à l'Italie, la Belgique, les Pays-Bas et l'Allemagne.

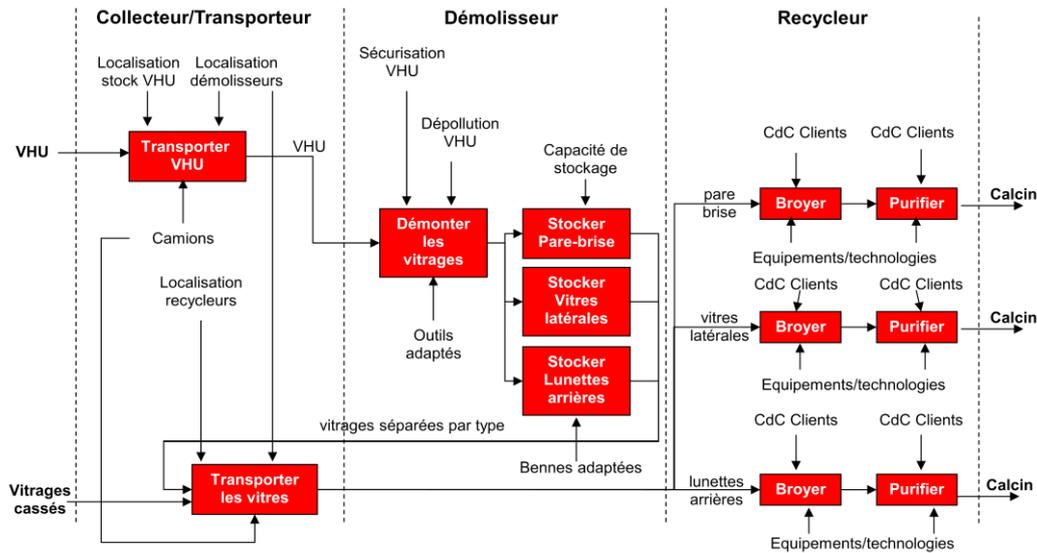
Or, la directive Européenne 2000/53/CE impose à tous les constructeurs automobiles Européens d'être capable de valoriser leurs véhicules hors d'usage à hauteur de 95% de leur masse en 2015 dont 85% en mode recyclage plutôt que valorisation énergétique. On peine aujourd'hui à arriver à 75% de recyclage, il faut donc jouer sur tous les matériaux secondaires du véhicule (pour le métal et le plastique c'est déjà fait !), le recyclage du verre apparait donc comme incontournable car le verre représente environ 4% du poids d'un véhicule (32 kg en moyenne). Le projet VALVER fait figure de projet démonstrateur pour d'autres matériaux secondaires, **l'enjeu est le démarrage à partir de rien d'une filière de recyclage économiquement viable sur le territoire français**. La pénalité pour non respect éventuel de la directive est estimée à 150 euros par verre de véhicule non recyclé en 2015 ; autant dire que les industriels sont motivés ! Le leader du projet est Renault Environnement et sa filiale orientée recyclage Pro-Recyclage. Ils entraînent les acteurs représentatifs de ce que sera la filière de recyclage de demain : les collecteurs (Suez Sita Environnement), les déconstructeurs (INDRA Re-source-industries), les recycleurs éventuels (IPAQ, Maltha) et les verriers traditionnels (Saint-Gobain Recherche).

Centrale est associée depuis le début à ce projet concret ; le LGI (Laboratoire Génie Industriel) veut aussi en faire un projet phare sur une problématique alliant les savoir-faire de ses deux équipes principales de recherche en conception/développement et en logistique/recherche opérationnelle. Il s'agit de **proposer une méthode qui permette avec l'aide d'acteurs industriels volontaires de bâtir d'ici 4 ans un véritable système industriel rentable (celui d'une filière de recyclage) en explorant en même temps des nouveaux marchés potentiellement utilisateurs de verres recyclés**.



Nos productions de recherche s'articulent autour de 4 livrables :

1. **Un modèle de représentation d'une filière de recyclage** au travers d'un processus ou diagramme de flux matière « enrichi » avec des informations utiles comme les flux économiques, l'état de la matière verre à un instant donné, le propriétaire du verre...

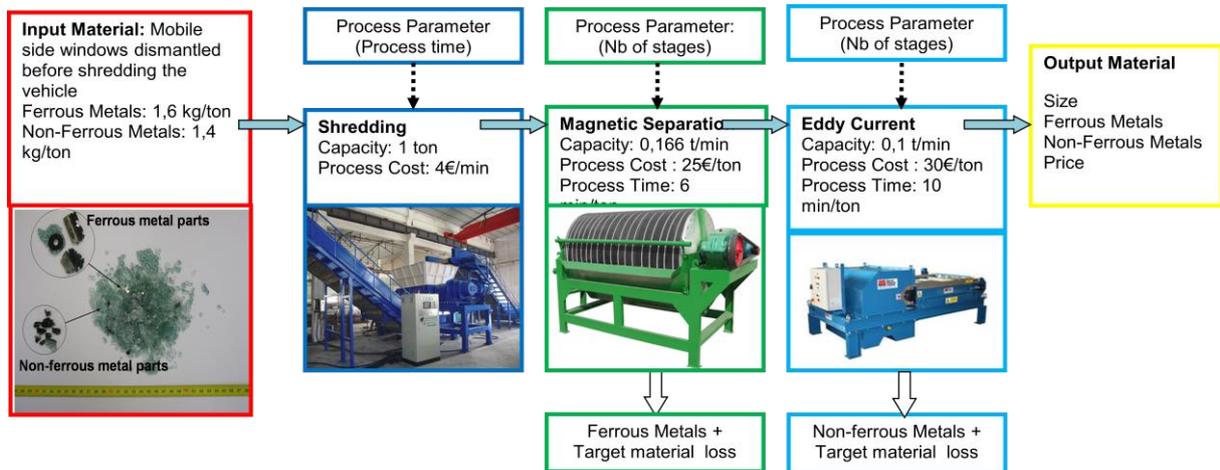


2. **Une méthode de conception innovante de scénarios futurs de filières de recyclage.** A partir d'une méthode dite de **Prospective Stratégique**, nous sommes en train de lister les acteurs de la filière de recyclage, leurs attendus et leurs influences mutuelles pour en déduire des facteurs déterminants dans la genèse d'une filière en France. A partir de ces facteurs déterminants, nous allons énumérer un certain nombre de **scénarios probables de filière** à 5-10 ans qui seront ultimement représentés par notre modèle (point 1).
3. Chacun de ces scénarios sera ensuite évalué au travers de deux types de simulateurs à mettre au point :
 - a. **La simulation de la rentabilité du marché du verre recyclé.** Ce modèle a déjà été développé. Nous sommes partis de l'identification d'un certain nombre de marchés industriels potentiels qui pourraient être tentés d'utiliser du verre matière première secondaire (MPS³) en substitution de matériaux existants ou en additifs. Nous avons interrogé des experts de ces secteurs industriels (le BTP pour des additifs du verre dans le béton ou l'enrobage de route, le secteur du mobilier et de la décoration intérieure, les secteurs traditionnels du verre plat et du verre creux...) et nous avons bâti des **modèles élémentaires d'utilité** qui sont des fonctions de désirabilité, dans un secteur industriel donné, d'un verre MPS, en fonction de ses propriétés de pureté⁴ et du prix de vente. Nous avons ensuite modélisé les quelques procédés de purification avec leur paramètres de réglage (temps de process, coûts élémentaires) influant sur le degré de purification du flux d'entrée et le prix de revient de l'opération. Nous avons été ainsi en mesure de **définir un cadre d'optimisation générale du dimensionnement des procédés de recyclage du verre en fonction des natures et quantités de verres désirés par les marchés potentiels**. Nous avons ainsi établi la **profitabilité générale de la filière** et sommes en mesure de simuler le nombre de filières distinctes de collecte (vraisemblablement 3 pour les pare-brises, les vitres latérales et les lunettes arrières), ainsi que décliner les **précautions de**

³ On parle dorénavant de *matière première secondaire* plutôt que de *déchets* ou de *matière recyclée*.

⁴ Notamment la non présence de particules de métal présentes dans les lunettes arrières ou de cailloux inclus lors des collectes

qualité de collecte, de manière à ne pas dégrader la valeur de la matière première en amont.



b. La **simulation de la performance environnementale de la filière**, en développant un outil d'ACV simplifiée.

4. Nous développerons ensuite une méthode d'aide au choix final d'un meilleur scénario en fonction de ses propriétés techniques, économiques et environnementales, ce qui correspond donc bien au cadre du Développement Durable.
5. Enfin, nous aiderons dans une étape ultime les acteurs actuels à s'engager vers des plans (*roadmaps*) stratégiques en les aidant (**approche de marketing stratégique**) à regrouper ou ambitionner des activités par acteur le long des chaînes de valeur. Nous les aiderons à se concerter pour la définition des stratégies et rôles technico-économiques sur la filière ainsi qu'à **établir leurs feuilles de route des investissements industriels**.

Après la mise au point de cette méthodologie pour la filière du verre, nous désirons à terme la mettre au service des défis à venir du recyclage comme **la gestion des déchets industriels diffus** dont la directive prochaine ne tardera pas à arriver.

Au-delà de cet engagement avec Renault, nous nous sommes engagés sur un projet à plus long terme sur **l'étude de scénarios d'écologie industrielle sur l'Ecopôle de Flins**, site réhabilité pour à la fois produire les véhicules électriques et recycler un certain nombre de VHU tout en bénéficiant d'un mode de transport fluvial. C'est l'occasion d'expérimenter in situ des flux en « boucle courte » de désassemblage, purification et réintroduction dans la production de véhicules neufs.

Eco-concevoir un bâtiment, un quartier

Une **chaire de recherche Bouygues Construction intitulée « Bâtir Durable et Innover »** vient d'être inaugurée en octobre 2010 avec les partenaires : Centrale Paris, Ecole des Ponts ParisTech, Supelec et le CSTB. La chaire a pour objectif de soutenir la recherche durant 5 ans sur les thématiques des technologies bas carbone, des bâtiments durables, des quartiers et villes durables.

Un des sujets de recherche qui a été initié et qui est porté par Centrale concerne la **modélisation des usages des occupants dans les bâtiments basse consommation pour évoluer vers une maîtrise de la garantie de performances énergétiques et environnementales**. En effet, on sait bien que les performances énergétiques effectives (et non théoriques ou moyennes) d'un bâtiment dépendent

beaucoup des usages au sein de ce bâtiment, des modes de vie et des comportements plus ou moins informés et vertueux des occupants. C'est d'autant plus vrai pour des bâtiments à énergie passive ou positive car les taux de présence, les comportements avec les appareils électriques, les fenêtres et la ventilation ont une importance déterminante sur la consommation d'appoint effective.

Conclusion

Eco-concevoir et éco-innover sont des opportunités de revoir de manière innovante son offre (produit, service, modèle économique). Il faut saisir cette chance. La recherche appliquée en conception durable apporte des solutions concrètes aux entreprises.

Les auteurs



Bernard Yannou est Professeur et Directeur-Adjoint du Laboratoire Génie Industriel (LGI) de Centrale, il dirige l'équipe de recherche Systèmes de Développement de Biens et Services (SDBS) et coordonne les activités de recherche en éco-conception. Il anime la chaire « Bâtir Durable et Innover » de Bouygues Construction à Centrale (incluant aussi Supélec, l'ENPC et le CSTB).



Gwenola Bertoluci est Maître de Conférences à AgroParisTech et rattachée en recherche à l'équipe SDBS du LGI. Elle est une spécialiste de l'intégration de l'éco-conception en entreprise, de l'éco-innovation agroalimentaire, de l'éco-conception emballage/produit/logistique. Elle est intégrée dans le groupe de travail ADEME/AFNOR sur l'étiquetage environnemental des produits de grande consommation.



Yann Leroy est Docteur en éco-conception et Attaché Temporaire de Recherches au LGI. Il travaille sur la maîtrise des incertitudes des résultats d'une Analyse de Cycle de Vie. Il fait partie du Groupe de travail Eco-conception de l'AFNOR qui prépare le projet de Norme X30-U s'inscrivant dans les travaux d'élaboration de la future norme ISO 14006 « Environmental management system-Guidelines on eco-design ». Ce groupe a été mandaté par la commission de normalisation pour définir les propositions françaises pour compléter les normes ISO 14001 et 14062 et servir de support d'aide à des applications industrielles et sectorielles d'éco-conception.



Asma Ghaffari est Maître de Conférences au LGI. Elle s'intéresse aux problématiques qui découlent d'une considération plus durable des opérations logistiques et de pilotage de flux dans les chaînes logistiques. Ayant notamment travaillé sur les pratiques de coordination entre acteurs d'une chaîne logistique, elle étudie le potentiel de ces pratiques à amener une réponse collective aux préoccupations environnementales et sociétales grandissantes des acteurs économiques.



François Cluzel est doctorant au LGI, il travaille dans le contexte d'ALSTOM GRID au développement et à l'intégration de méthodes et d'outils d'éco-conception dans le processus de développement des systèmes électriques. Il s'intéresse en particulier à l'ACV de systèmes industriels complexes et à la valorisation des résultats auprès des clients par la mise en place d'outils adaptés. Ses travaux s'appliquent aux sous-stations de conversion AC/DC d'ALSTOM GRID.