



**HAL**  
open science

# Vers une meilleure prise en compte de l’empreinte environnementale de systèmes industriels complexes par une approche d’ACV basée sur des scénarios d’exploitation

François Cluzel, Bernard Yannou, Yann Leroy

## ► To cite this version:

François Cluzel, Bernard Yannou, Yann Leroy. Vers une meilleure prise en compte de l’empreinte environnementale de systèmes industriels complexes par une approche d’ACV basée sur des scénarios d’exploitation. XIVème congrès SFGP 2013, Oct 2013, Lyon, France. sfgp2013120658. hal-00875335

**HAL Id: hal-00875335**

**<https://hal.science/hal-00875335>**

Submitted on 21 Oct 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.

# Vers une meilleure prise en compte de l’empreinte environnementale de systèmes industriels complexes par une approche d’ACV basée sur des scénarios d’exploitation

CLUZEL François<sup>a\*</sup>, YANNOU Bernard<sup>a</sup>, LEROY Yann<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ecole Centrale Paris, Laboratoire Génie Industriel  
Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France

## Résumé

L’Analyse du Cycle de Vie (ACV) est couramment répandue en entreprise comme outil d’évaluation environnementale. Mais elle est également associée à un certain nombre de limites, comme le manque ou la qualité des données récoltées. Cette problématique est amplifiée face à des systèmes industriels complexes, caractérisés par un grand nombre de sous-systèmes et composants et un cycle de vie extrêmement long et incertain. Différentes méthodes existent pour gérer précisément l’incertitude des données, mais elles sont généralement fortement consommatrice de temps et de ressources. Lorsque l’objectif de l’ACV est d’orienter la recherche de projets d’amélioration, une grande précision des résultats n’est pas forcément nécessaire. Nous proposons ici une approche d’ACV par scénarios permettant de modéliser avec peu d’information différentes trajectoires possibles d’exploitation d’un système industriel complexe. A partir de l’identification d’éléments du cycle de vie particulièrement incertains et pertinents à intégrer (maintenance, pièces de rechange, accidents, mise à niveau, modulation de la durée de vie, options de fin de vie), des scénarios d’exploitation sont bâtis à partir d’un outil adapté, la matrice SRI (*Stanford Research Institute*). Elle permet de générer rapidement un ensemble de 4 scénarios (pire des cas, meilleur des cas, futur probable et une alternative différente) permettant d’appréhender l’étendue des impacts environnementaux possibles en fonction des décisions de l’exploitant et des aléas naturels ou politico-économiques. La simulation de ces scénarios permet alors de fiabiliser les décisions prises sur la base de l’ACV. L’ensemble de l’approche a été appliquée chez Alstom Grid sur des stations de conversion AC/DC pour l’industrie de l’aluminium primaire.

**Mots-clés :** Eco-conception, Evaluation environnemental, Analyse du Cycle de Vie (ACV), scénario d’exploitation, système industriel complexe.

## 1. Introduction

Dans les dernières années, l’Analyse du Cycle de Vie (ACV) est devenu un outil essentiel pour réaliser une démarche d’éco-conception en entreprise. Elle permet l’identification des postes impactants du cycle de vie d’un système afin de générer des données d’entrée pour l’améliorer (Finnveden and Ekvall, 1998). Cependant l’ACV nécessite un grand nombre de données de bonne qualité (Reap et al., 2008a, 2008b), et est donc particulièrement consommatrice de temps et de ressources. Cette limite est particulièrement amplifiée lorsque des systèmes industriels complexes sont considérés. La complexité induit en effet des problèmes majeurs en termes de modélisation ou de configuration. Dans cet article, nous définissons un système industriel complexe au sens de l’éco-conception comme un système : à grande échelle en termes de sous-systèmes et composants, masses et ressources ; dont le cycle de vie est difficilement prévisible sur le long terme en phase de conception, en particulier sa durée de vie, ses mises à niveaux, ses opérations de maintenance et sa fin de vie ; dont les sous-systèmes ont eux-mêmes des cycles de vie et des durées d’obsolescence différents ; en interaction proche avec son environnement (sur-système, site géographique...) ; supervisé par des décisions humaines (Cluzel et al., 2012). Dans une démarche d’éco-conception d’un tel système, l’ACV réalisée à un haut niveau systémique permet d’alimenter un

---

\* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : [francois.cluzel@ecp.fr](mailto:francois.cluzel@ecp.fr)

processus d'amélioration environnementale du système. Dans ce cas-là, commun à de nombreux départements de R&D en entreprise, il n'est pas nécessaire d'obtenir des résultats d'ACV extrêmement détaillés. C'est en effet plutôt la fiabilité des tendances d'impacts environnementaux qui importe (Leroy and Froelich, 2010). Mais les grandes incertitudes associées au cycle de vie du système ne permettent pas d'atteindre cette fiabilité. De nombreuses données sont en effet hors d'atteinte, particulièrement sur la phase d'exploitation ou de fin de vie. On obtient alors des résultats décorrélés des réelles pratiques industrielles sur le cycle de vie du système, et donc non-représentatifs.

Nous nous intéressons donc dans cet article à l'identification d'un compromis entre la simplification du modèle d'ACV, la validité scientifique des résultats et le potentiel d'amélioration du système. Le modèle d'ACV idéal permettrait d'obtenir une vision globale d'une famille de produits tout en prenant en compte les spécificités d'exploitation du système. La notion de scénario est particulièrement adaptée pour prendre en compte ces différentes variables avec des valeurs quantitatives limitées. C'est pourquoi nous la préférons à des modèles de modélisation des incertitudes plus mathématiques (voir par exemple (Huijbregts, 1998)) mais trop complexes et difficilement applicables dans notre contexte (Ross et al., 2002). Les deux objectifs visés par cette approche sont la fiabilisation des ACVs de systèmes industriels complexes utilisées pour alimenter un programme de R&D amont, mais également l'initiation de dialogues avec les clients afin de définir des trajectoires d'exploitation de ces systèmes plus durables.

Nous considérons tout d'abord dans la partie 2 les techniques de développement de scénarios et leurs applications en ACV pour ensuite décrire notre modèle dans la partie 3. La partie 4 vise à déployer cette méthodologie sur un cas d'étude chez Alstom Grid, avant de conclure en partie 5.

## 2. Développement de scénarios et utilisation en ACV

### 2.1 Définition et classification de scénarios

La notion de scénarios dans des approches basées sur des modèles a reçue de nombreuses définitions, dont Pesonen et al. donnent un aperçu (Pesonen et al., 2000). Ils choisissent la définition suivante, que nous reprenons : un scénario en ACV est « *une description d'une situation future possible, pertinente pour des applications spécifiques en ACV, basée sur des hypothèses spécifiques sur le futur, et (lorsque cela est approprié) incluant également la présentation du développement du présent vers ce futur.* »

Différents types de scénarios sont proposés dans les études prospectives. Börjeson et al. en proposent une catégorisation en 3 catégories et 6 types (Börjeson et al., 2006). Les scénarios prédictifs répondent à la question « *Que va-t-il se passer ?* ». Ils peuvent être de type *forecast* (prédiction) ou *what-if* (que se passe-t-il si...). Les scénarios exploratoires répondent à la question « *Que peut-il se passer ?* ». Ils peuvent être de type *external* (considérant des facteurs externes) ou *strategic* (conditionnés à certaines actions réalisées d'une certaine manière). Les scénarios normatifs répondent à la question « *Comment une cible spécifique peut-elle être atteinte ?* ». Ils peuvent être de type *preserving* (ajustement à la situation actuelle) ou *transforming* (la structure préexistante change nécessairement). A partir de cette typologie, différentes techniques de modélisation des scénarios existent et sont synthétisées par la suite.

### 2.2 Techniques de développement de scénarios

Börjeson et al. distinguent trois principales étapes pour générer un ensemble de scénarios (Börjeson et al., 2006) : (1) Génération d'idées et de connaissances sur des morceaux de futur ; (2) Intégration dans des scénarios ; (3) Vérification de la consistance des scénarios.

La difficulté d'une telle approche réside principalement dans la seconde étape, qui nécessite des techniques particulières. Bishop et al. proposent 8 catégories de méthodes pour cela (Bishop et al., 2007) :

1. Jugement : basées sur le jugement des individus décrivant le futur.
2. Scénario de base/attendu : ces techniques ne produisent qu'un seul scénario, qui peut être la base de scénarios alternatifs (en utilisant d'autres techniques).
3. Elaboration de scénarios fixes : à partir d'outils simples pour créer un nombre prédéfini de scénarios.
4. Séquence d'événements : basées sur des arbres de probabilité.
5. *Backcasting* : basées sur un futur désirable et l'identification du moyen pour l'atteindre.
6. Dimensions de l'incertitude : basées sur l'identification des sources spécifiques d'incertitude.
7. Analyse d'impacts croisés : basées sur des matrices et le calcul de probabilités conditionnelles.
8. Modélisation : basées sur des simulations et la variation des entrées ou de la structure du modèle.

Ces différentes méthodes concernent le développement de scénarios en général. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons plus particulièrement au domaine de l'ACV.

### 2.3 Scénarios en ACV

L'annexe 2 du rapport CALCAS D7 (Zamagni et al., 2008) fournit une revue précise de la littérature concernant l'utilisation de scénarios en ACV. La définition des scénarios est réalisée durant la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude, tandis que leur modélisation est réalisée durant les phases d'inventaire et d'évaluation des impacts. Les résultats sont discutés durant la phase d'interprétation.

Du côté des applications pratiques, Höjer et al. considèrent que les scénarios externes (au sens de la typologie proposée par Börjeson et al. (Börjeson et al., 2006)) sont adaptés à l'ACV pour évaluer différentes options pour le système étudié sous l'influence de différents paramètres externes. Weidema et al. proposent de leur côté une approche en 5 étapes, assez proche de celle de Börjeson et al. (Weidema et al., 2004) : (1) Identification des parties pertinentes du système de produits ; (2) Identification de la précision nécessaire ; (3) Choix d'une méthode appropriée ; (4) Développement des scénarios ; (5) Vérification de la consistance. Ils soulignent également l'importance de scénarios extrêmes. Le nombre de scénario à considérer est une autre problématique soulevée par Pesonen et al. (Pesonen et al., 2000). Un nombre limité de scénarios (moins de 4) est recommandé pour faciliter les prises de décision (Wack, 1985), par exemple un scénario de base et deux alternatives. A partir de cet état de l'art, nous proposons dans la partie 3 une méthodologie originale pour l'ACV de systèmes industriels complexes.

## 3. Méthodologie

### 3.1 Positionnement général

Si l'utilisation de scénarios semble particulièrement adaptée à la problématique de la modélisation de la variabilité d'exploitation d'un système industriel complexe, les objectifs des applications existantes en ACV sont bien différents. Elles se situent en effet à un niveau plus stratégique ((Lloyd and Ries, 2007) :

- Pour comparer des alternatives de produits quand le futur est imprévisible ou peut suivre différentes trajectoires (par exemples les mixes électriques futurs), correspondant à des scénarios *what-if*.
- Pour réaliser les meilleurs choix dans le développement (par exemple) de politiques publiques en minimisant les impacts environnementaux, ce qui correspond à des scénarios normatifs.

Ces deux perspectives se focalisent déjà sur l'optimisation des impacts environnementaux, tandis que nous souhaitons rendre les résultats d'ACV plus robustes parce que la phase d'exploitation opérationnelle du système considéré est très mal documentée et peut fortement varier d'un site industriel à l'autre. Ce positionnement nécessite de développer des scénarios exploratoires externes (*external*) au sens de Börjeson et al. A partir de ce positionnement, nous proposons d'appliquer les 5 étapes proposées par Weidema et al. (Weidema et al., 2004):

1. Identification des parties pertinentes du système de produits : réalisée en capitalisant les projets passés et en rencontrant des experts au sein de l'entreprise ou chez les clients.
2. Identification de la précision nécessaire : les résultats doivent permettre d'identifier des projets d'amélioration à un haut niveau, mais un grand degré de précision n'est pas nécessaire.
3. Choix d'une méthode appropriée : parmi les 8 catégories d'outils proposés par Bishop (Bishop et al., 2007), très peu sont adaptés à nos besoins, étant jugées trop simplistes ou au contraire basées sur des données quantifiées non disponibles. Finalement, les techniques d'élaboration de scénarios fixes sont les plus adaptées car elles sont facilement applicables, ne nécessitent pas de données quantifiées trop précises et sont pleinement compatibles avec des scénarios d'exploitation. Deux techniques sont proposées mais seule une répond réellement à nos besoins : la matrice SRI (Stanford Research Institute). Il s'agit d'un outil très simple d'utilisation développé à la fin des années 70. Elle considère 4 scénarios : futur attendu, pire des cas, meilleur des cas, et une alternative très différente, c'est-à-dire incluant des événements surprenants ou inhabituels (Bishop et al., 2007). Cette dernière alternative est utilisée ici pour tester la robustesse du modèle.
4. Développement des scénarios : La matrice est construite de la manière suivante : les scénarios sont listés dans les colonnes, tandis que les « dimensions du monde » (ici, les parties pertinentes du système) sont listées dans les lignes. Les cases sont ensuite remplies pour chaque scénario et chaque paramètre, en fonction des données collectées ou estimées. On obtient ainsi les 4 scénarios.

5. Vérification de la consistance : la consistance de ces scénarios est vérifiée manuellement. En effet, étant donné le faible nombre de scénarios (4), il est aisé de contrôler qu'ils couvrent bien un large ensemble de cycles de vie possibles.

Le paragraphe suivant donne plus de détails sur les étapes 1 et 4 de la démarche.

### 3.2 Identification des paramètres et construction des scénarios

Tableau 1. Matrice SRI simplifiée

Eléments pertinents	Meilleur des cas	Futur attendu	Pire des cas
<i>Programmes de pièces détachées</i>	Quantités contractuelles	Quantités contractuelles	Quantités intensifiées (plus que contractuelles)
<i>Accidents de transport</i>	Pas d'accident	Pas d'accident	Quelques accidents
<i>Maintenance préventive</i>	Intensifiée (le client est très réactif et dépasse les recommandations)	Normale (le client respecte les recommandations)	Négligée (le client ne suit pas les recommandations)
<i>Maintenance corrective</i>	Minimale (la maintenance préventive intensifiée limite la maintenance corrective)	Moyenne	Intensifiée (la maintenance corrective négligée augmente la maintenance corrective)
<i>Mises à niveau/modernisations</i>	Aucunes (les équipements sont en bonne santé et répondent aux besoins du client)	Moyennes (quelques équipements deviennent obsolètes et nécessitent d'être changés)	Intensifiée (quelques équipements deviennent obsolètes et sont en mauvais états. De nouveaux équipements sont nécessaires)
<i>Modulation de la durée de vie</i>	Extension de la durée de vie (due à la bonne santé des équipements)	Aucune (la durée de vie initiale correspond à la réalité)	Raccourcissement (certains équipements sont en mauvais état ou la situation économique est instable)
<i>Fin de vie</i>	Optimisée (hauts taux de recyclage) + transfert d'équipements pour être réutilisés sur d'autres sites	Standard (taux de recyclage moyens), pas de transfert	Minimaliste (faibles taux de recyclage), pas de transfert

Après avoir étudié le cycle de vie de quelques sous-stations Alstom Grid, différentes « parties pertinentes » du système qui n'ont pas été prises en compte dans les premières ACV ont été identifiées. Ce processus n'est pas nouveau, puisqu'il a déjà été utilisé dans des approches précédentes (Ostad-Ahmad-Ghorabi and Collado-Ruiz, 2011). Cependant même si ces parties pertinentes sont issues de connaissances d'experts et de projets passés, nous considérons qu'elles restent valables pour un grand nombre de systèmes industriels et peuvent facilement être réutilisées. 7 éléments ont ainsi été listés :

- Programmes de pièces détachées, planifiés au moment de la conception du système ;
- Accidents de transports pouvant occasionner la perte d'équipements ;
- Opération de maintenance préventive ;
- Opération de maintenance corrective ;
- Mises à niveau ou modernisation (remplacement ou ajout de sous-systèmes) ;
- Extension ou raccourcissement de la durée de vie initiale (en fonction par exemple du contexte politico-économique ou de décisions du client) ;
- Scénario de fin de vie, qui dépend souvent du pays d'implantation, et pouvant inclure le transfert d'un ou plusieurs sous-systèmes encore en état sur un autre site industriel.

Le remplissage de la matrice SRI permet alors de définir les 4 scénarios. Le Tableau 1 illustre la matrice de manière qualitative pour trois scénarios. L'identification de paramètres quantifiables pour chacun des éléments pertinents permet ensuite de remplir la matrice de manière quantitative.

### 3.3 Valorisation des résultats

La réalisation de l'ACV pour chacun des scénarios permet alors de fournir des données utiles pour deux types d'utilisation. La première perspective est interne à l'entreprise. Elle concerne l'identification d'un portefeuille de projets de R&D éco-innovants. L'utilisation de ce modèle assure une prise de décision robuste associée à des problématiques environnementales valides pour un grand nombre de clients. C'est un puissant outil pour garantir la capacité du système à atteindre des objectifs environnementaux alors que les impacts dépendent en grande partie de paramètres exogènes au concepteur du système.

La seconde perspective est à destination des clients. Dans l'exemple proposé dans le contexte d'Alstom Grid, il apparaît que les concepteurs n'ont que très peu de degrés de liberté pour modifier le système existant, les spécifications des clients étant très détaillées techniquement. La capacité d'innover radicalement est donc très limitée, car seules des technologies prouvées sur le long terme sont choisies. Un dialogue avec les clients est donc nécessaire pour introduire de nouvelles technologies et les rendre acceptables. L'approche d'ACV proposée dans cet article fournit un outil intéressant pour supporter un tel dialogue. En effet les résultats d'ACV peuvent révéler des problématiques d'exploitation et permettre l'introduction de recommandations d'exploitation (réutilisation de composants par exemple) et de technologies ou de services plus écologiques (concernant la maintenance ou la fin de vie par exemple). Cette utilisation possible des résultats ne sera pas plus détaillée dans cet article.

Par la suite, nous proposons d'appliquer l'approche théorique proposée aux sous-stations Alstom Grid.

## 4. Application à une sous-station Alstom Grid de conversion AC/DC

### 4.1 Contexte

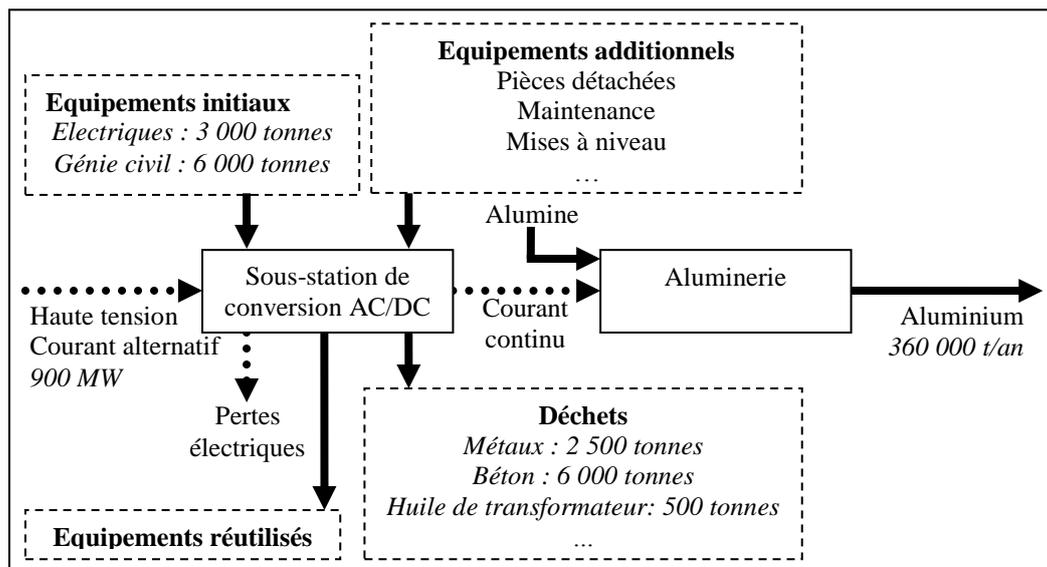


Figure 1. Aperçu des flux associés à une sous-station d'électrolyse

Alstom Grid PEM (Power Electronics Massy) conçoit, assemble et vend des sous-stations de conversion AC/DC pour l'industrie de l'aluminium primaire dans le monde entier. Il s'agit de systèmes électriques conçus pour convertir l'énergie du réseau à haute tension en énergie utilisable pour l'électrolyse de l'aluminium, industrie très consommatrice d'énergie et environnementalement impactante (Schmidt and Thrane, 2009). Une sous-station représente environ 3000 tonnes d'électronique de puissance et de transformateurs et 6000 tonnes de génie civil. Un aperçu du système est proposé en Figure 2 La durée de vie d'un tel système est généralement de l'ordre de 30 à 40 ans. Beaucoup d'incertitudes existent sur l'ensemble du cycle de vie du système. Aucun scénario de fin de vie n'est par exemple précisément établi, et chaque site industriel possède ses propres spécificités. Dans le cadre d'une démarche d'éco-conception chez Alstom Grid, le modèle d'ACV par scénarios d'exploitation a été appliqué.

## 4.2 Objectifs et périmètre

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer de manière robuste les impacts environnementaux potentiels du cycle de vie d'une sous-station de conversion AC/DC grâce à différents scénarios d'exploitation. Ces scénarios permettent de personnaliser l'ACV d'une sous-station générique pour un site industriel précis. Dans le contexte d'Alstom Grid, il s'agit également d'alimenter une démarche d'éco-innovation à partir des résultats d'ACV. 4 phases de cycle de vie sont considérées : matériaux (incluant l'extraction des matières premières et la fabrication), distribution (transport du système sur son lieu d'exploitation), utilisation et fin de vie. Chacun des 7 éléments pertinents du Tableau 1 ont été associés à la phase du cycle de vie correspondante. L'ACV est appliquée à un projet de sous-station pour une aluminerie en cours de construction en Inde (projet Hindalco), alimentée par une centrale captive au charbon. L'unité fonctionnelle suivante est utilisée : « Assurer sans interruption la conversion d'énergie à haute tension en énergie utilisable pour l'électrolyse de l'aluminium ( $360 \text{ kA}_{DC}$ ,  $1650 \text{ V}_{DC}$ ) dans le respect du cahier des charges Hindalco, en considérant l'ensemble du cycle de vie du système normalisé sur une année ». Cette normalisation est nécessaire pour comparer des alternatives avec des durées de vie différentes.

Une précédente étude (Cluzel et al., 2012) a montré l'importance du mix électrique dans l'évaluation des impacts d'une sous-station. Deux mixes électriques extrêmes sont donc considérés : électricité issue du charbon (cas Hindalco), et hydro-électricité (cas associé à de nombreuses alumineries dans le monde). L'ACV est réalisée grâce au logiciel SimaPro 7.3. En dehors des données spécifiques d'Alstom Grid, les données d'inventaire proviennent de la base Ecoinvent V2.1. Les résultats sont calculés grâce à la méthode ReCiPe 2008 midpoint (H) V1.03. Un questionnaire Excel a été utilisé pour quantifier les scénarios, et les paramètres ont été rentrés manuellement dans le logiciel d'ACV. En dehors des 4 scénarios de la matrice SRI, un dernier scénario « figé », nommé « Cas initial », est considéré pour valider la pertinence de la méthode. Il représente les résultats de l'ACV « classique » réalisée précédemment (Cluzel et al., 2012) sans considérer les éléments d'exploitation modélisés dans cet article.

## 4.3 Résultats

Pour simplifier la présentation dans cet article, les résultats d'ACV ont été restreints à 8 catégories d'impact considérées comme représentatives dans ce cas précis. La Figure 2 présente les résultats obtenus avec le mix hydro-électrique. Le scénario « Pire des cas » est choisi comme référence (100%), et les autres sont positionnés par rapport à celui-ci.

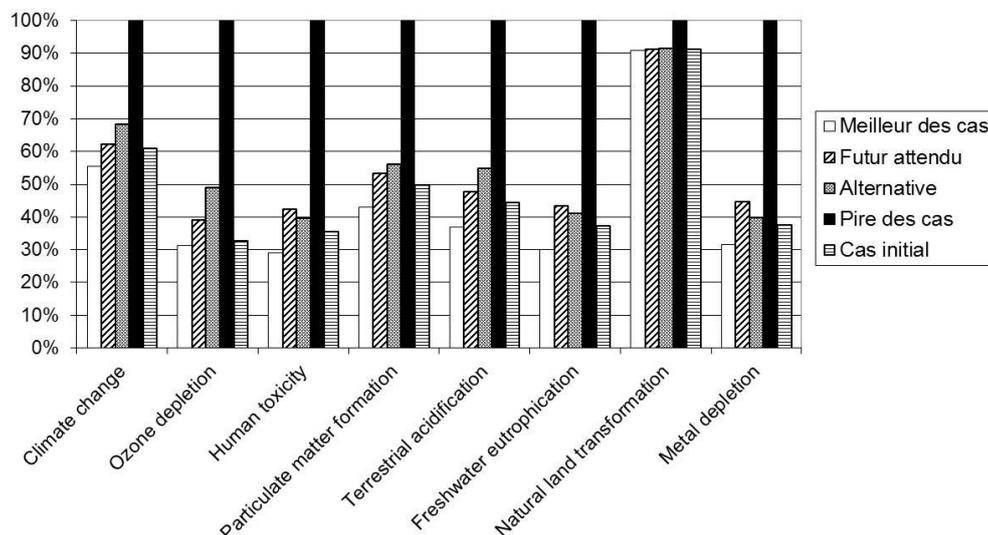


Figure 2. Comparaison des impacts environnementaux potentiels des 5 scénarios avec un mix hydro-électrique

Dans tous les cas (électricité issue du charbon, et hydro-électricité), le scénario « Pire des cas » est logiquement le moins bon, tandis que le scénario « Meilleur des cas » est le plus performant. Le « Cas initial » est toujours plus impactant que le « Meilleur des cas », mais toujours moins impactant que le « Futur attendu ». Les scénarios « Futur attendu » et « Alternative » sont toujours assez proches (écart inférieur à 10%). Cependant, l'écart relatif entre le « Pire des cas » et « Meilleur des cas » dépend

clairement du mix électrique considéré. Dans le cas de l'électricité issue du charbon, cet écart est inférieur à 20% sur 6 des 8 indicateurs considérés. Mais dans le cas de l'hydro-électricité, cet écart est la plupart du temps très important, dépassant même 70% pour l'indicateur *Human toxicity*.

Ces résultats montrent plusieurs choses. Premièrement, l'ACV réalisée sans le modèle de scénarios d'exploitation (« Cas initial ») ne révèle pas tous les impacts environnementaux potentiels générés sur le cycle de vie du système. Si la réalité diffère du futur attendu, l'écart entre ces résultats d'ACV et les résultats obtenus avec les scénarios d'exploitation peuvent être extrêmement importants. Par ailleurs, les écarts observés entre les scénarios « Pire des cas » et « Meilleur des cas » justifient à eux-seuls la nécessité d'un tel modèle, tant les impacts peuvent différer d'une situation d'exploitation du système à une autre. En revanche, le scénario « Alternative » n'apporte pas d'éléments nouveaux, et ne sera pas nécessairement modélisé dans les utilisations futures du modèle.

Enfin, une étude de sensibilité a été menée pour identifier quelles « parties pertinentes » influent réellement et dans quelle proportion sur les résultats. Cette analyse de sensibilité diffère de celles généralement pratiquées en ACV puisqu'il s'agit ici d'évaluer de manière simplifiée les incertitudes associées aux données de l'inventaire. Elle permet ici d'identifier les « parties pertinentes » du cycle de vie les plus impactantes pour optimiser les futures implémentations du modèle. Il apparaît que la contribution de la maintenance préventive et des programmes de pièces détachées est négligeable, et le modèle pourrait donc être simplifié en ne les prenant pas en compte. En revanche, les mises à jour/modernisations contribuent énormément aux impacts et doivent être modélisés avec soin. Lorsque les matériaux représentent une contribution importante aux impacts (c'est-à-dire dans le cas de l'hydro-électricité), la modulation de la durée de vie, la fin de vie et les accidents de transport sont également d'importants contributeurs. Enfin, la maintenance corrective n'est un contributeur important que sur la catégorie d'impact *Ozone depletion*, ce qui est dû à l'utilisation d'un matériau particulier dans un composant essentiel.

## 5. Conclusions

Nous avons proposé dans cet article un modèle d'ACV basé sur la modélisation de scénarios d'exploitation afin d'évaluer rapidement et de manière robuste la performance environnementale d'un système industriel complexe. Un cas d'étude a été proposé pour tester et valider l'approche. Nous avons montré que la modélisation de 3 scénarios d'exploitation (pire des cas, meilleur des cas et futur attendu) enrichit fortement la compréhension des impacts environnementaux du cycle de vie d'un système industriel complexe lorsque peu de données sont disponibles. Si l'ACV classique permet d'identifier les postes à améliorer, cette méthode fiabilise de manière efficace et satisfaisante les décisions prises sur la base de cette ACV en évaluant le degré d'incertitude associé à l'exploitation du système.

Cependant, ce modèle doit être manipulé par un expert en ACV. Des travaux futurs pourront considérer une automatisation du modèle afin de le rendre plus opérationnel dans un contexte d'entreprise.

### Remerciements

Nous remercions tout particulièrement Frankie Rico-Sanz pour ses contributions aux parties applicatives. Nous remercions également chaleureusement Dominique Millet de Supméca, ainsi que Joël Devautour et François Puchar d'Alstom Grid pour leur support à ce projet.

### Références

- Bishop, P., Hines, A., Collins, T., 2007. The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight* 9, 5–25.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., 2006. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38, 723–739.
- Cluzel, F., Yannou, B., Leroy, Y., Millet, D., 2012. Proposition for an Adapted Management Process to Evolve from an Unsupervised Life Cycle Assessment of Complex Industrial Systems Towards an Eco-Designing Organisation. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 20, 111–126.
- Finnveden, G., Ekvall, T., 1998. Life-cycle assessment as a decision-support tool—the case of recycling versus incineration of paper. *Resour Conserv Recy* 24, 235–256.
- Huijbregts, M.A.J., 1998. Application of uncertainty and variability in Life Cycle Assessment. *Int J Life Cycle Ass* 3, 273–280.
- Leroy, Y., Froelich, D., 2010. Qualitative and quantitative approaches dealing with uncertainty in life cycle assessment (LCA) of complex systems: towards a selective integration of uncertainty according to LCA

- objectives. *Int J Design Eng* 3, 151–171.
- Lloyd, S.M., Ries, R., 2007. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. *J Ind Ecol* 11, 161–179.
- Ostad-Ahmad-Ghorabi, H., Collado-Ruiz, D., 2011. Tool for the environmental assessment of cranes based on parameterization. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16, 392–400.
- Pesonen, H.-L., Ekvall, T., Fleischer, G., Huppes, G., Jahn, C., Klos, Z.S., Rebitzer, G., Sonnemann, G.W., Tintinelli, A., Weidema, B.P., Wenzel, H., 2000. Framework for scenario development in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 5, 21–30.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., 2008a. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1: goal and scope and inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 290–300.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., 2008b. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2: impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 374–388.
- Ross, S., Evans, D., Webber, M., 2002. How LCA studies deal with uncertainty. *Int J Life Cycle Ass* 7, 47–52.
- Schmidt, J., Thrane, M., 2009. Life cycle assessment of aluminium production in new Alcoa smelter in Greenland.
- Wack, P., 1985. Scenarios: shooting the rapids. *Harvard Bus Rev* 63, 139–150.
- Weidema, B.P., Ekvall, T., Pesonen, H.-L., Rebitzer, G., Sonnemann, G.W., Spielmann, M., 2004. Scenarios In Life-Cycle Assessment. SETAC, Pensacola, USA.
- Zamagni, A., Buttol, P., Porta, P.L., Buonamici, R., Masoni, P., Guinée, J., Ekvall, T., 2008. CALCAS WP5-D7: Critical review of current research needs and limitations related to ISO-LCA practice - Annex 2 - Reports of the topics and approaches analyzed ( No. CALCAS WP5-D7 Annex 2), CALCAS (Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability).

---

## **Toward a better consideration of the environmental footprint of complex industrial systems thanks to an approach based on exploitation scenarios LCA**

CLUZEL François<sup>a\*</sup>, YANNOU Bernard<sup>a</sup>, LEROY Yann<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ecole Centrale Paris, Laboratoire Genie Industriel  
Grande Voie des Vignes, 92290 Chatenay-Malabry, France

### **Abstract**

This paper considers the variabilities that exist in the exploitation of a complex industrial system. Existing quantitative uncertainty methods in LCA require a huge amount of accurate data. These data are rarely available in simplified and upstream LCA for complex industrial systems. A scenario-based approach is the best compromise between acceptable quality of results and resources required. That is why we propose a scenario-based LCA model that ensures the reliability of results in situations where the system life cycle is very uncertain, where there is substantial lack of data and/or where time and resources available are limited. The method proposed here considers a limited number of scenarios (3 or 4) that are defined using the Stanford Research Institute (SRI) matrix. Using results from past projects and expert knowledge, relevant parts of the system are listed and parameters are associated with these parts and quantified. A classical LCA process then provides the results for the different scenarios. The method was applied to an Alstom Grid AC/DC conversion substation for the primary aluminium industry. Relevant parts were thus clearly identified: spare parts program, transport failures, preventive and corrective maintenance, updates and revampings, lifetime modulation and end-of-life. Four scenarios were considered: best case, worst case, baseline (expected future) and a highly different alternative. Results show the pertinence of considering several exploitation scenarios when the life cycle is not predictable, as the environmental impacts may vary widely from one case to another.

**Keywords:** Eco-design, environmental evaluation, Life Cycle Assessment (LCA), exploitation scenario, complex industrial system.

---

\* Author to whom the correspondence should be sent : [francois.cluzel@ecp.fr](mailto:francois.cluzel@ecp.fr)