

Étude exploratoire de l'intégration de la faisabilité dans le processus d'éco-conception

Florian Bratec

Université de Technologie de Troyes

12, rue Marie Curie

Troyes - France

florian.bratic@utt.fr

Résumé

L'éco-conception est aujourd'hui une approche incontournable dans les processus d'innovation des industriels. Divers outils et méthodologies, telle que l'Analyse du Cycle de Vie, permettent d'assister le concepteur ou l'expert environnement dans son travail de reconception. Néanmoins, la notion de faisabilité est une priorité à intégrer dans ce processus : qu'elle soit technique, économique ou organisationnelle, seule la faisabilité d'une proposition d'éco-conception permet à l'entreprise de valider son plan d'action. L'établissement du lien entre paramètres de conception et paramètres environnementaux est alors étudiée dans cet article.

Les techniques d'ingénierie des connaissances ont été utilisées sur une base documentaire issue d'une entreprise. Ce corpus documentaire, sur la thématique du génie mécanique, a permis l'identification des paramètres de conception usuellement mobilisés et leur compilation en une base de données unique regroupement des caractéristiques de conception technique, économiques et environnementaux.

Mots-clés

éco-conception ; faisabilité ; ingénierie des connaissances

I. INTRODUCTION

L'intégration de l'éco-conception en industrie est de plus en plus considérée comme une condition nécessaire au développement durable. L'éco-conception doit être déployée à chaque étape de la conception du produit. Il permet de réduire l'impact de la production sur l'environnement tout en favorisant l'implication des acteurs de la conception et de toute la chaîne de valeur. Il convient de noter que la prise en compte des questions environnementales dans la conception peut modifier les objectifs, les ressources, les processus et les indicateurs de performance d'une entreprise. Les modalités techniques et économiques qui mènent au développement des produits peuvent jouer un rôle majeur dans la réduction des impacts environnementaux tout en stimulant l'innovation [2][11]. Les objectifs d'éco-conception (utilisation de matériaux renouvelables, recyclage, réduction de l'énergie, etc.) associés à des objectifs économiques et sociaux (implication des acteurs, partage des connaissances, aspects culturels, etc.) sont plus ou moins pris en considération, de manière proactive ou prescriptive. Ces approches conduisent à développer des solutions innovantes (économie circulaire, production d'énergie hybride, etc.). On peut noter que l'éco-conception s'inscrit dans la logique de l'innovation environnementale [1] visant de réduire l'impact matériel et énergétique des activités industrielles.

De nos jours, plusieurs outils sont développés pour aider les concepteurs à considérer les paramètres environnementaux dans leurs activités. Néanmoins, sans lier ces paramètres aux indicateurs de conception, l'étude de la faisabilité de solutions innovantes reste compromise. Dans cet article, une étude exploratoire pour lier les critères de conception aux paramètres environnementaux est proposée. Les techniques d'ingénierie des connaissances (Studer et al, 1998) pour définir des indicateurs de conception, à partir de documents d'entreprise, sont mobilisées.

II. PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

L'intégration des questions environnementales dans la conception a été clairement identifiée par Victor Papanek dans son livre «Design for the Real World: Human Ecology and Social Change» (1971) [10]. Coca-Cola a été la première entreprise à réaliser une étude multicritère pour évaluer les impacts environnementaux liés à la production et à la fin de vie de leurs produits (E. Harry et Jr. Teastley, 1969). La méthodologie a été formalisée vingt ans plus tard en tant qu'« Analyse du Cycle de Vie ».

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet aux concepteurs d'accéder à des informations environnementales sur leurs produits. La méthode est basée sur l'ensemble du cycle de vie du produit: de l'extraction des matières premières au traitement de fin de vie du produit, en tenant compte également des étapes d'approvisionnement, de production, de distribution, d'utilisation et de maintenance. La méthodologie ACV est maintenant cadrée par la norme de gestion environnementale ISO14000 [5] depuis 2006.

Sur la base d'une unité fonctionnelle, l'ACV peut fournir un aperçu des impacts environnementaux potentiels d'un produit. Grâce à une liste de matériaux et de données sur l'ensemble du cycle de vie (processus de production, transports, traitements, énergie, etc.) reliés à une base de données d'impacts, il est possible de générer un inventaire de cycle de vie (ICV) détaillant tous les flux entrant et sortant liés à un produit. Ces entrées et sorties quantifient de nombreuses substances et éléments, en fonction de la base de données utilisée. Chaque substance ou élément, extrait ou émis, a un impact potentiel sur l'environnement: plusieurs méthodes de caractérisation peuvent alors traduire l'ICV en un aperçu des impacts du produit.

Le choix de la méthode de caractérisation dépend des catégories d'impact sélectionnées (orientées-problèmes ou orientées-dommages), de son acceptation internationale et de sa représentativité géographique (Commission européenne - Joint Research Centre, 2010). De cette façon, un matériau ou un procédé peut être rattaché à une « photographie d'impacts », composée de plusieurs indicateurs. Ces indicateurs environnementaux sont séparés en deux catégories d'impacts : les impacts mid-point et les impacts end-point. Les impacts mid-point sont généralement représentatifs des problèmes environnementaux: ils quantifient un effet mais non une conséquence. Une émission de dioxyde de carbone est un problème environnemental et représente un impact mid-point bien connu: le réchauffement climatique. Les impacts end-point sont la représentation d'un dommage environnemental, une conséquence finale: elle pourrait être une perte de biodiversité ou le changement climatique (qui est une conséquence du réchauffement climatique). Dans cette étude, le fascicule FD E01-008 (2014) [3] a été utilisé pour obtenir des données environnementales sur les matériaux et les procédés de l'ingénierie mécanique. Cela a permis d'accéder à six indicateurs:

- Énergie primaire (MJ)
- Épuisement des ressources (Sbéq.)
- Changement climatique (CO₂éq.)
- Acidification (SO₂ éq.)
- Eutrophisation (PO₄- éq.)
- Création d'ozone photochimique (C₂H₄ éq.)

La brochure fournit des facteurs de caractérisation basés sur une unité de référence de matériaux (kg) ou de processus (kg, heures, mètres, etc.). Par exemple, selon son type et sa quantité, l'utilisation d'un matériau peut entraîner plusieurs de ces impacts potentiels (figure 1).

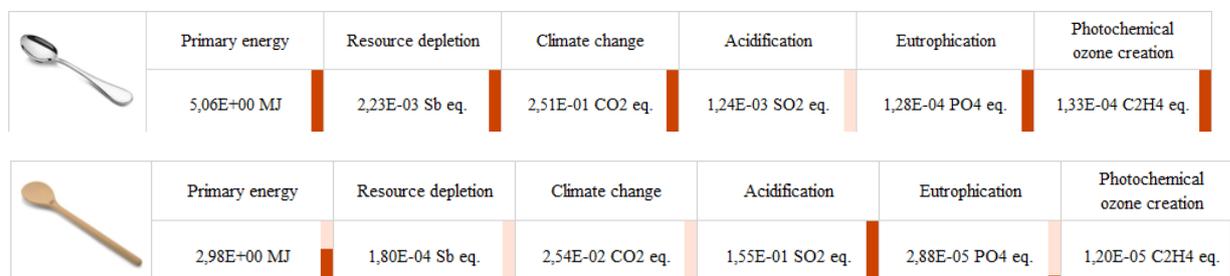


Figure 1. COMPARAISON D'UNE CUILLÈRE EN ACIER INOXYDABLE (120G) ET D'UNE CUILLÈRE EN BOIS (120G)

Les barres rouges représentent 100% de l'impact maximum pour un indicateur: par exemple, sur l'énergie primaire, la cuillère en acier inoxydable représente l'un

impact maximum (5,06 MJ) et la cuillère en bois atteint 59% de ce maximum (2,98 MJ). Dans ce cas simple, sans tenir compte des processus de production et de l'ensemble

du cycle de vie des cuillères, les résultats obtenus pourraient conduire à préférer l'utilisation du bois pour concevoir la cuillère (en fonction des objectifs environnementaux).

Bien que ce type d'indicateur permette au concepteur d'intégrer les aspects environnementaux dans leur processus décisionnel, la question de la faisabilité demeure fondamentale sur plusieurs aspects, notamment : techniques, économiques et organisationnels.

III. DESIGN-TOOLS VERSUS ECO-TOOLS

A. *L'importance de lier la conception et les objectifs environnementaux*

La question de lier les pratiques de conception et les changements environnementaux est devenue majeure dans le monde industriel. Depuis l'émergence de l'éco-conception, de multiples outils et méthodes ont été développés et évoluent encore avec les experts et les industries [12]. Ces outils sont mobilisés par deux types d'utilisateurs: d'une part, les spécialistes de l'environnement qui ne connaissent généralement pas les aspects techniques et organisationnels de la conception et d'autre part les concepteurs qui n'ont pas de connaissances environnementales à leur disposition. Cela conduit à des difficultés à appliquer une utilisation pratique et efficace de ces outils [13]. Par exemple, l'utilisation de l'évaluation du cycle de vie nécessite beaucoup de temps de la part du concepteur et beaucoup de connaissances et de données sur l'environnement [9]. Enfin, la séparation des paramètres environnementaux obtenus avec les outils d'ACV du processus de conception ne permet pas aux concepteurs de d'assister leur processus décisionnel.

B. *L'approche d'éco-conception des concepteurs*

Conscients de la question de lier les paramètres environnementaux et de conception, certains développeurs ont essayé d'implémenter des données environnementales dans des logiciels de conception, tels que Dassault Systèmes ou Granta Design.

Dassault Systèmes (France) est une société d'édition de logiciels spécialisée dans la conception 3D, la maquette 3D et la gestion du cycle de vie des produits (PLM).

Ils ont développé un add-on pour leur produit SOLIDWORKS, appelé « SOLIDWORKS Sustainability ». Cet outil permet au concepteur d'obtenir des informations environnementales au stade de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) sur une modélisation 3D. Ce module fournit une image des impacts potentiels du futur produit, en utilisant les indicateurs environnementaux issus d'une base de données ACV.

Granta Design (Royaume-Uni) est une spin-out de l'Université de Cambridge spécialisée dans l'ingénierie des matériaux. Pour accompagner les concepteurs dans leurs décisions de reconception, ils ont développé un logiciel permettant de sélectionner et de comparer plusieurs matériaux, référençant les propriétés techniques du matériau (densité, élasticité, conductivité, etc.), appelé CES Selector. Granta Design fournit un moyen d'obtenir des informations sur l'environnement à partir de leur logiciel : l'outil « Eco Audit ». Sur la base des matériaux choisis, le logiciel est capable de calculer une estimation des impacts environnementaux potentiels avec deux indicateurs: les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Dans les deux cas, l'utilisateur ciblé est le concepteur (et non un expert en environnement) qui suit le processus de reconception suivant (Figure 2):

- 1 : Cadrage technique : le concepteur doit fournir une liste de matériaux qui sont liés à des données simplifiées sur le cycle de vie du produit et potentiellement des informations sur la géométrie et la forme du produit. Le résultat de cette étape est un « inventaire technique ».
- 2: Calcul d'impact: l'outil sélectionné, relié à une base de données environnementale et à des méthodes de calcul, génère l'impact environnemental potentiel du produit sur la base de l'inventaire technique.
- 3: Optimisation de la composition du produit: sur la base des résultats, le concepteur est en mesure de faire varier certains paramètres techniques afin de réduire les impacts environnementaux potentiels.
- 4: Comparaison d'impacts : le concepteur peut vérifier l'amélioration environnementale potentielle de son cadre technique optimisé.

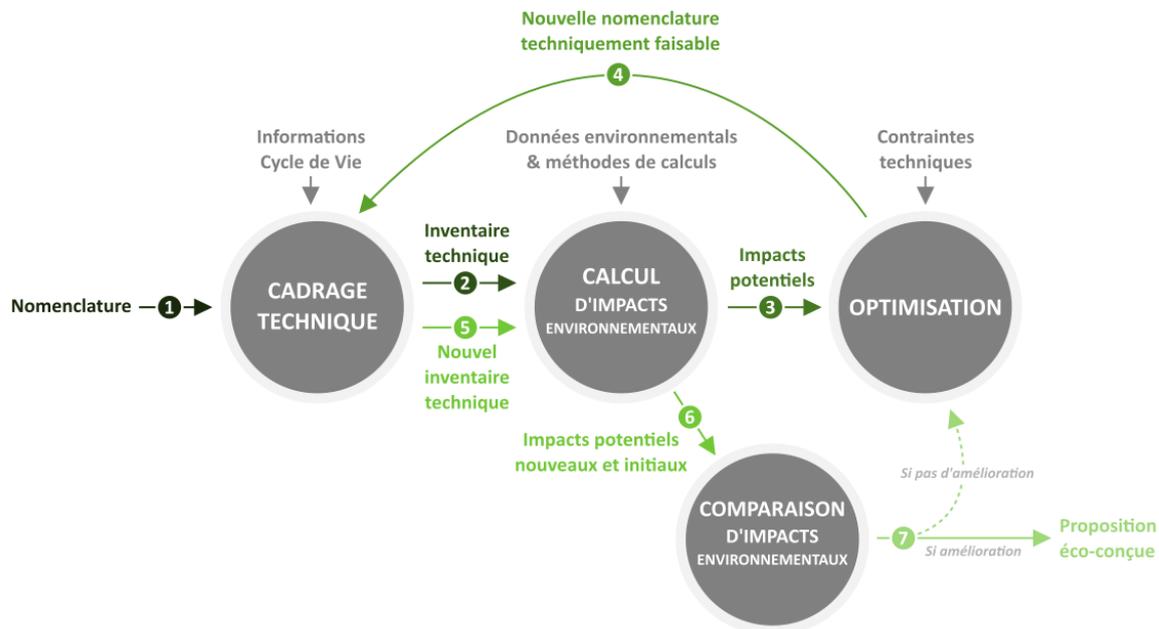


FIGURE 2. PROCESSUS D'ECO-CONCEPTION POUR UN CONCEPTEUR

Ce type d'approche oblige le concepteur à garder et à modifier le concept du produit à partir du premier cadre technique qu'il a défini précédemment. Il n'est pas en mesure de proposer d'autres concepts, car il n'est pas expert en environnement: via ce processus d'éco-conception, le concepteur essaie d'atteindre des objectifs environnementaux en fonction de contraintes techniques afin de s'assurer de la faisabilité technique de sa proposition.

C. Approche écologique des experts en environnement

Si une proposition éco-conçue est réalisable sur les aspects techniques mais aussi sur les aspects économiques (coûts, avantages, etc.) et organisationnels (disponibilité des technologies, intégration dans l'entreprise, etc.), elle sera considérée comme valable du point de vue de la société [6]. Cependant, les outils classiques du concepteur ne permettent pas d'intégrer l'ensemble de ces éléments de faisabilité.

Bien que les experts en environnement ne soient généralement pas en mesure d'accéder aux connaissances nécessaires pour modéliser une proposition réalisable sur le plan technique, ils utilisent des outils d'Analyse du Cycle de Vie pour proposer directement des concepts «éco-optimisés». Parmi les principaux outils logiciels d'ACV utilisés dans ce processus de re-conception, il est possible de citer SimaPro, GaBi, Umberto et openLCA.

Tous ces outils sont reliés à des bases de données environnementales et à des méthodes de calcul pour évaluer les impacts potentiels du produit. Cependant, contrairement aux outils de conception présentés précédemment, les outils d'ACV incluent habituellement de nombreux indicateurs environnementaux et permettent de connecter plusieurs bases de données et méthodes de calcul: cela fournit des résultats plus précis et permet de faire varier les paramètres environnementaux (au lieu de faire varier certains paramètres techniques comme dans le cas précédent).

Le processus de reconception peut être découpé en quatre étapes (figure 3) :

- 1: Cadrage technique: l'expert en environnement doit fournir une liste des matériaux et des données de cycle de vie (transports, utilisation, fin de vie, etc.). Cette étape donne un inventaire technique sur l'ensemble de la durée de vie du produit.
- 2: Calcul d'impact : cette étape fournit les impacts potentiels du produit.
- 3: Génération de concepts : sur la base des résultats, l'expert en environnement est en mesure de proposer des concepts alternatifs au produit initial, en fonction de paramètres environnementaux. À ce stade, il est sûr de générer des solutions «éco-optimisées » mais ne peut garantir leur faisabilité technique.
- 4: Étude de faisabilité: cette dernière étape est décisive pour offrir une véritable solution éco-conçue réalisable.

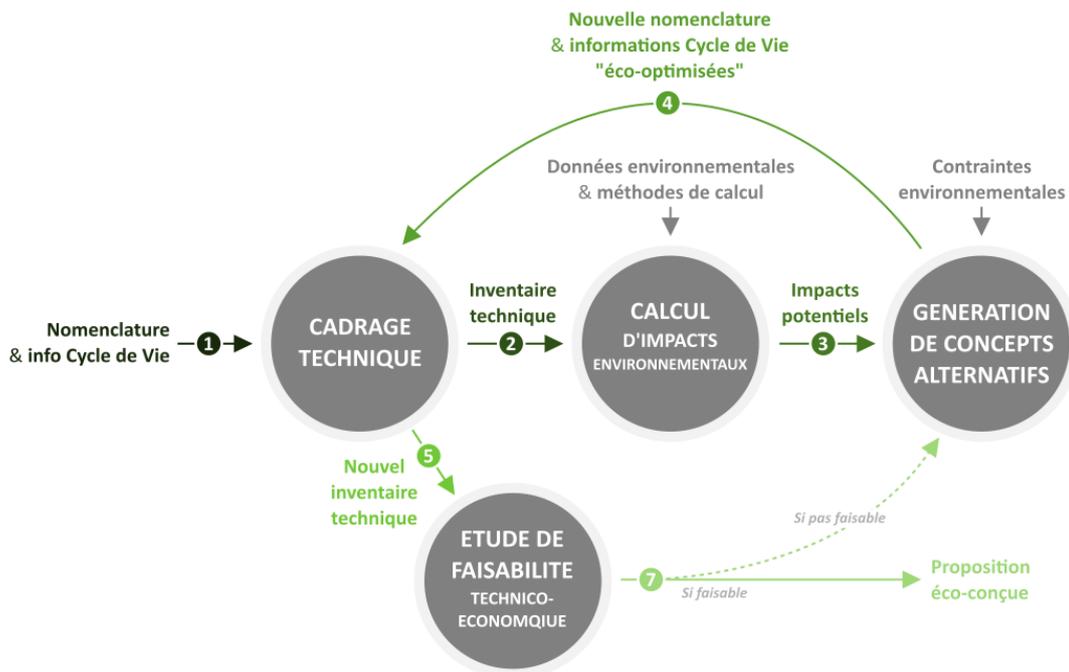


FIGURE 3. PROCESSUS D'ECO-CONCEPTION POUR UN EXPERT EN ENVIRONNEMENT

La quatrième et dernière étape de ce processus est particulière: contrairement au processus de reconception décrit en 3.2, il n'existe en réalité aucun outil intégrant l'ensemble de ces étapes. L'étude de faisabilité technico-économique est réalisée avec le concepteur. En effet, l'expert en environnement intègre toujours les connaissances du concepteur pour s'assurer de la faisabilité de ses solutions [7].

Dans la première approche, les contraintes techniques guident les changements possibles sur le produit. Cependant, ces contraintes diffèrent selon le concepteur ciblé qui pourrait être l'utilisateur du logiciel. Selon sa position dans l'entreprise (et suivant la taille de l'entreprise), ses compétences peuvent être plus appropriées aux systèmes logistiques, industriels, ergonomiques ou autres. Pour cette raison, l'expert en environnement semble être la personne la plus appropriée dans l'entreprise pour imaginer des solutions « éco-optimisées ». Néanmoins, toutes les compétences techniques décrites précédemment doivent être intégrées dans une phase d'étude de faisabilité: cela implique de recueillir ces connaissances et d'accéder aux données pour l'expert en environnement.

IV. LIER PARAMÈTRES DE CONCEPTION ET PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX

Comme première étape de cette étude, les paramètres de

conception peuvent être identifiés à partir de l'analyse d'expérience en entreprise. Par conséquent, des documents d'expertise rassemblés dans une jeune entreprise, contenant des données de conception sur les matériaux et les processus, ont été analysés. Dans cette section, il est détaillé comment les caractéristiques définissant ces matériaux et processus ont été identifiés.

A. Documents d'expertise

Altermaker est une jeune start-up spécialisée dans le développement de logiciels pour soutenir la conception pour la durabilité. La société a mené un état de l'art des pratiques industrielles en matière d'utilisation des matériaux et des procédés en génie mécanique. Les résultats sont stockés sous la forme de documents MsPowerpoint dans lesquels plusieurs éléments sont définis pour chaque matériau ou procédé : avantages, inconvénients, description brève et comparaisons spécifiques. Dans ces documents (figure 4), plusieurs caractéristiques sont intéressantes à considérer (notamment des caractéristiques techniques quantifiables comme de la résistance thermique, par exemple) et d'autres nécessitent une analyse plus approfondie (notamment des données textuelles). Notre étude vise à analyser ces documents afin de définir les concepts qui définissent les principales caractéristiques des matériaux et des processus utilisés en mécanique.

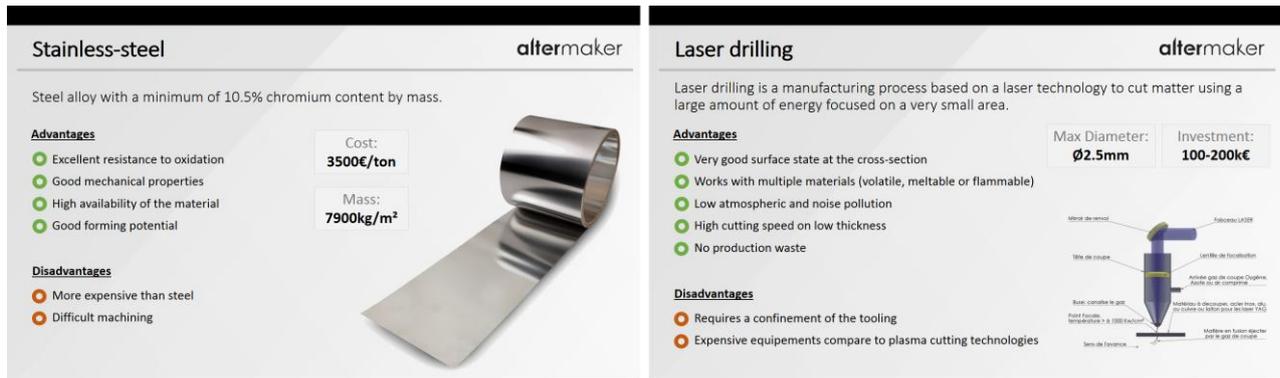


FIGURE 4. EXEMPLE DE DOCUMENTS ALTERMAKER (FICHE MATERIAU ET FICHE PROCEDURE)

B. Analyse statistique des documents

Les techniques d'ingénierie des connaissances formalisées par Studer [14] ont été mobilisées pour analyser les documents d'Altermaker. Dans ce type d'approche, les documents d'expertise peuvent être analysés afin d'identifier le rôle que les éléments peuvent jouer dans la résolution de problèmes liés à un domaine spécifique, tel que la mécanique, ce que l'on appelle des concepts. Les paramètres de conception recherchés sont nommés « caractéristiques » dans cette étude.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées dans l'analyse de documents : l'approche du TextMining[4] qui est basée sur la répétition de chaînes de caractères et sur les relations entre ces chaînes, est notamment retenue. Dans cette étude, chaque fiche représente un matériau ou un procédé spécifique. Par conséquent, utiliser des outils automatiques de TextMining ne peut pas être intéressant dans notre cas : les documents doivent être analysés manuellement.

Caractéristiques	Slides concernées	Occurrences	Pourcentage
Absence de pli	309	1	1%
Adapté à la réalisation des empreintes des moules par injection plastique	239	1	1%
Adapté au prototypage fonctionnel	278	1	1%
Adapté aux matériaux réfléchissants	229	1	1%
Ajustage et serrage au plus près des pièces assemblées	260	1	1%
Amélioration résistance	168, 269, 270, 294, 301	8	10%
Applications	165, 271, 272, 295, 296	6	8%
Approvisionnement matière première	276, 310	2	3%
Après polymérisation, opération nécessaire	282	1	1%
Aucun usinage de la matrice ; Aucun stock des outillages (matrice)	250	1	1%
Aucune rétrécissement ou déformation	240	1	1%
Automatisable	152, 253, 261, 295, 299	5	6%
Bi composant	283	1	1%
Caractéristiques mécaniques du résultat du procédé (en sortie)	195, 299, 306, 308, 309	23	29%
Collerette réalisée avec la rouleuse	309	1	1%
Compacité des matériaux (en sortie)	248, 285	2	3%
Contenance	301	1	1%
Déformation après usinage	231, 232	2	3%
Déformation/Affection thermique	229, 230	2	3%
Dégraissage du tube	305	1	1%
Densité du produit fini	167, 270, 274, 275, 277	6	8%
Dépendance au refroidissement et au fluide lubrifiant	308, 309	2	3%
Dimension des pièces (en entrée/sortie)	184, 287, 297, 300, 308	18	23%
Economie d'usinage	245	1	1%
Economies / Pertes matières	144, 245, 257, 258, 310	11	14%
Encombrement	310	1	1%

TABEAU 1. EXEMPLE DES PREMIERES CARACTERISTIQUES IDENTIFIEES.

Au total, 80 fiches ont été analysées pour les matériaux et 157 pour les procédés. Les documents de procédés sont déjà classés par catégories (fabrication, assemblage et découpe). Cependant, il n'y a pas de classement des fiches matériaux. À travers l'analyse des documents, la procédure peut se découper comme suit:

- 1 : Identification des caractéristiques à partir de leur description, de leurs avantages et de leurs inconvénients (tableau 1).
- 2 : Comptage des occurrences de caractéristiques dans l'ensemble des fiches.

- 3 : Validation des caractéristiques retenues auprès de deux experts mécaniques de l'éco-conception chez Altermaker afin d'éliminer le bruit, les conflits et de s'assurer de la pertinence de chaque caractéristique.
- 4 : Regroupement des fiches en catégories et sous-catégories en fonction de leurs caractéristiques communes.
- 5 : Validation des regroupements auprès des deux experts mobilisés précédemment.
- 6 : Analyse des omissions afin de compléter, éventuellement, les catégories et sous-catégories établies (tableau 2).

Process Types	Nb slides	Nb characteristics					
		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
		Ident. characs	statistics	Validation 1	Splitting	Validation 2	Missing
Manufacturing	68	113	113	28	33	32	25
Assembling Tubes	6	45	45	20	23	21	20
Assembling Tubes	47	115	115	52	55	51	39
Heatting	7	23	23	19	20	19	17
Micro-drilling	5	22	22	15	15	15	14
Micro-manufacturing	6	20	20	15	16	14	14
drilling	12	26	26	17	19	19	16
Contacted joins	6	22	22	18	18	18	17
	157						

TABLEAU 2. RESULTATS DE L'ANALYSE DES DOCUMENTS DE PROCESSUS.

C. Classification des caractéristiques

La répétition des caractéristiques est ensuite utilisée pour les classer. D'une part, notre classification vise à souligner l'impact des procédés et des matériaux sur l'environnement et, d'autre part, à aider les concepteurs à sélectionner les procédés et les matériaux dans un processus d'éco-conception. Par exemple, les principales caractéristiques du processus sont identifiées comme suit: coût, consommation, pollution, technicité, etc. (Figure 5).

Pour les matériaux, les caractéristiques suivantes sont par exemple été identifiées : la résistance, la compacité, la conductivité, le poids, etc. Ensuite, pour chaque type de processus (assemblage, perçage, soudage, ...), des valeurs sont associées à ces classifications.

Ces caractéristiques et classifications identifiées ont permis de construire une base de données de processus et de matériaux avec des données techniques, organisationnelles et économiques. Les données environnementales du fascicule FD E01-008 [3] ont été analysées et intégrées dans une base de données unique avec les informations issues de l'analyse des documents appartenant à Altermaker. Les paramètres environnementaux et de conception sont maintenant reliés et prêts à être mis en œuvre dans un logiciel pour appuyer la prise de décision des experts environnementaux.

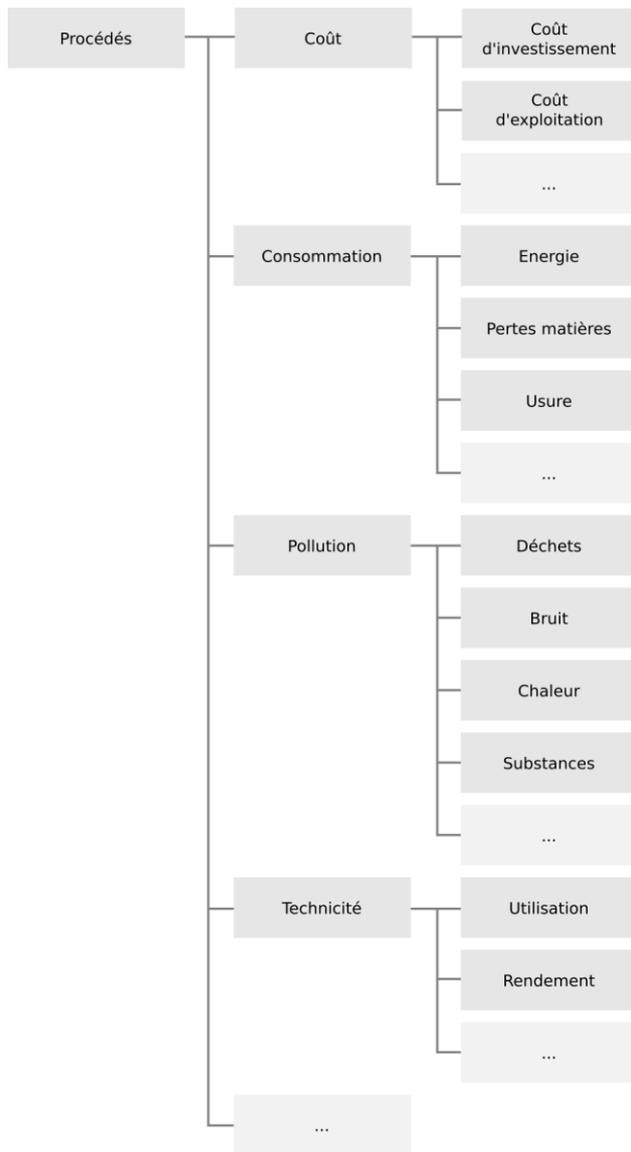


FIGURE 5. EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DES PROCEDES, AVEC CLASSIFICATION

V. CONCLUSION

Considérer les paramètres environnementaux devient une nécessité dans la conception. Les industries ont de plus en plus recours aux techniques d'éco-conception pour répondre à ce besoin. Ces approches peuvent être classés en deux catégories : pour les experts en environnement et pour les concepteurs. Les paramètres utilisés dans ces deux types d'approches visent à assister l'identification des impacts environnementaux potentiels et à s'assurer de la faisabilité technique de la reconception. Dans ce travail, l'objectif est de caractériser le lien entre ces deux aspects afin d'aider les experts en environnement à améliorer la faisabilité de leurs solutions éco-conçues. Ainsi, les caractéristiques techniques et économiques des procédés et des matériaux classiquement utilisés dans le secteur mécanique sont identifiées à l'aide des techniques d'ingénierie des connaissances, à partir d'un ensemble de documents construits par une entreprise spécialisée dans l'édition de logiciels d'éco-conception.

Dans cet article sont détaillées les différentes étapes pour analyser ces types de documents. Les caractéristiques seront ensuite intégrées dans une base de données unique afin de rendre son implémentation possible dans un logiciel d'éco-conception développé par l'entreprise Altermaker et de tester son utilisation par les experts environnementaux pour améliorer le processus de reconception: de l'étude de l'impact environnemental à l'amélioration de la faisabilité d'une solution.

D'autres documents seront étudiés afin d'obtenir une représentation complète des caractéristiques et de tendre à l'ontologie des caractéristiques de l'éco-conception en tenant compte des aspects liés à la notion de faisabilité.

VI. REFERENCES

- [1] Depret, M. H., & Hamdouch, A. (2009). Quelles politiques de l'innovation et de l'environnement pour quelle dynamique d'innovation environnementale?. *Innovations*, (1), 127-147.
- [2] Dewulf, W. (2003). Design for sustainability-anticipating the challenge. In *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design*, Stockholm.
- [3] FD E01-008 (2014). Mechanical products – Environmental data.
- [4] Feldman, R., & Sanger, J. (2007). *The text mining handbook: advanced approaches in analyzing unstructured data*. Cambridge University Press.
- [5] ISO, I. (2006). 14040: Environmental management–life cycle assessment–principles and framework. London: British Standards Institution.
- [6] Knight, P., & Jenkins, J. O. (2009). Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of cleaner production*, 17(5), 549-558.
- [7] Kozemjak da Silva M., Remy S., Reyes T. (2015). On providing design process information to the environmental expert. *Research in Engineering Design* 26:327–336
- [8] Krueger, T., Page, T., Hubacek, K., Smith, L., & Hiscock, K. (2012). The role of expert opinion in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 36, 4-18.
- [9] Michelin, F., Vallet, F., Reyes, T., Eynard, B., & Duong, V. L. (2014). Integration of environmental criteria in the co-design process: case study of the client/supplier relationship in the French mechanical industry. In *Proceedings of the DESIGN 2014 13th international design conference*. Dubrovnik (pp. 1591-1600).
- [10] Papanek, V. (1971). *Design for the real world: Human ecology and social change*.
- [11] Pimenta, H. D., Gouvinhas, R. P., & Evans, S. (2012). Eco-efficiency within extended supply chain as product life cycle management. In *Sustainable manufacturing* (pp. 255-262). Springer Berlin Heidelberg.
- [12] Rio, M., Reyes, T., & Roucoules, L. (2013). Toward proactive (eco) design process: modeling information transformations among designers activities. *Journal of Cleaner Production*, 39, 105-116
- [13] Rossi, M., Charon, S., Wing, G., & Ewell, J. (2006). Design for the next generation: incorporating cradle-to-cradle design into Herman Miller products. *Journal of Industrial Ecology*, 10(4), 193-210.
- [14] Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25(1), 161-197.
- [15] Vicky, L., 2006. Ecodesign tools for designers: defining the requirements. *Journal of Cleaner Production* 14, 1386-1395