

Méthodologie de prise en compte des impacts environnementaux et sociaux dans la définition de problématiques de recherche : application aux structures composites instrumentées

Methodology for taking into account environmental and social impacts in the definition of research issues: application to smart composite structures

Florence Bazzaro¹, Yann Meyer^{2,3}

¹Laboratoire ELLIADD, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Belfort, France, florence.bazzaro@utbm.fr

²Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Belfort, France, yann.meyer@utbm.fr

³Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, CNRS, FRE 2012 Roberval, Centre de recherche Royallieu, CS 60 319 Compiègne cedex, France

RÉSUMÉ. La nécessité de développer des politiques durables, responsables et respectueuses de l'environnement a émergé dans le débat public depuis plusieurs années et a permis d'aboutir à un cadre législatif accompagnant la conception d'un produit, d'un service ou d'un système, notamment au niveau des entreprises. Cependant, ce cadre est peu adapté aux études menées dans le milieu académique laissant le chercheur seul face à ses propres responsabilités sans outil lui permettant de nourrir sa réflexion. Cette article propose une approche méthodologique, adaptée aux chercheurs d'un domaine d'activité particulier, lui permettant de s'interroger et de mener une réflexion sur les enjeux sociaux et environnementaux liés aux objets de son étude. Pour illustrer notre propos, le cas des structures composites instrumentées est étudié.

ABSTRACT. For several years now, we have seen a need to develop sustainable, responsible and environmentally friendly policies. This has led to a legislative framework guiding the design of a product, service or system, particularly at the company level. However, this framework is not well suited to studies conducted in the academic environment, leaving the researcher alone to face his or her own responsibilities without tools to help develop his or her intellectual approach. This article proposes a methodology, adapted to researchers in a particular field of activity, allowing them to question and think about the social and environmental issues related to the subjects of their study. As an example, our approach is applied to a study case: smart composite structures.

MOTS-CLÉS. Eco-innovation, scénarisation, cycle de vie, structures composites instrumentées

KEYWORDS. Eco-innovation, story-telling, life cycle, smart composite structures

Introduction

La prise de conscience des enjeux majeurs de la mise en oeuvre de politiques durables, responsables et respectueuses de notre environnement a permis l'émergence depuis quelques années de nombreux travaux autour de la prise en compte des aspects environnementaux lors de la conception de produits, services ou systèmes. En effet, 80 % de l'impact environnemental d'un produit, d'un service, d'un système est déterminé lors de l'étape de conception (WENZEL, HAUSCHILD et ALTING, 2000). Dans cette lignée de réflexion est également apparu le concept de responsabilité sociétale des entreprises. Selon la définition de la norme ISO 26000 Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale (ISO26000, 2010), la responsabilité sociétale se définit comme la responsabilité d'une organisation vis-à-vis des impacts de ses décisions et activités sur la société et sur l'environnement se traduisant par un comportement éthique et transparent qui contribue au développement durable. Ainsi, les entreprises doivent, selon

cette norme, intégrer des considérations sociales et environnementales dans leurs prises de décision, et connaître, voire répondre, des impacts de leurs décisions et activités sur la société et l'environnement. En tant qu'acteurs des organisations de recherche, il nous semble pertinent de nous interroger sur ces problématiques de responsabilité sociétale au niveau de nos activités et décisions scientifiques. De nombreux laboratoires de recherche, notamment en sciences pour l'ingénieur se focalisent sur la conception, le développement de nouvelles technologies, de nouveaux produits, services ou systèmes. Pour les aider dans leurs choix de conception, de développement, ils disposent essentiellement de méthodes et d'outils en éco-conception (ISO14-040, 2006), mais qui partent du postulat que le produit étudié est finalisé. Ces outils sont donc peu adaptés aux travaux menés en laboratoire de recherche qui s'intéressent souvent à des produits, des technologies en cours de développement (DOMINGO, 2013 ; GUILLOUX, 2009). Nous avons retenu le terme de brique technologique pour qualifier ces produits en cours de développement. Ainsi, cette brique technologique peut se définir comme une invention reposant sur un élément technologique ne constituant pas nécessairement un produit fini. Elle est en cours de maturation, en laboratoire, en cellule R&D d'une entreprise, et se positionne sur un TRL, Technology Readiness Level (ISO16290, 2013), bas, entre 1 et 5. De plus, ses usages ne sont pas nécessairement définis ou le sont partiellement. Dans le cadre de nos recherches, nous proposons une approche méthodologique, adaptée aux chercheurs de tout domaine thématique, leur permettant de s'interroger, de mener une réflexion sur les enjeux sociaux et environnementaux liés aux technologies, aux produits, aux processus, objets de leurs études. Ainsi, notre problématique de recherche s'interroge sur quelles méthodes, outils, démarches de conception pour guider le chercheur dans la prise en compte des dimensions environnementales et sociales lors du développement d'une brique technologique ? Dans cette perspective, nous proposons dans un premier temps, un état de l'art sur les méthodes et outils favorisant, d'une part, la prise en compte des enjeux environnementaux notamment à travers les méthodes et outils d'éco-conception et d'éco-innovation, et d'autre part sur la prise en compte des dimensions sociales, à travers l'étude des approches en conception durable ou "design for sustainability". Dans un second temps, en nous appuyant sur les constats issus de la littérature, nous proposons une approche méthodologique permettant de guider les chercheurs dans la prise en compte des dimensions environnementales et sociales lors du développement d'une brique technologique. Afin de mettre en évidence, la pertinence de notre proposition, nous présenterons une étude de cas, reposant sur l'étude d'une brique technologique spécifique : les matériaux composites instrumentés. Nous concluons en discutant notre approche méthodologique, d'une part, à travers l'esquisse d'autres cas d'applications et d'autre part, au regard de l'approche système Produits-Services dans laquelle nos travaux peuvent s'intégrer. Enfin, nous concluons sur la responsabilité individuelle de chaque chercheur dans l'utilisation de la méthode proposée afin que sa philosophie soit respectée.

1. Etat de l'art

1.1. Méthodes et outils d'éco-conception et d'éco-innovation

Selon la Norme NF X 30-264 Management environnemental - Aide à la mise en place d'une démarche d'éco-conception (AFNOR, 2013), une démarche d'éco-conception supporte l'"intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits (biens et services, systèmes) avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie à service rendu équivalent ou supérieur. Cette approche, dès l'amont d'un processus de conception, vise à trouver le meilleur équilibre entre les exigences environnementales, sociales, techniques et

économiques dans la conception et le développement de produits". De nombreuses approches méthodologiques ont été proposées pour aider les concepteurs dans la prise en compte de l'environnement, comme par exemple, la norme ISO 14 040 : 2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO14-040, 2006), la méthode PROMISE (VERKOOYEN, 1994), les outils Environmental Design of Industrial Products Tool, EDIP Tool (WENZEL, HAUSCHILD et ALTING, 1997) et EcoReDesign (RMIT, 1997). Comme le souligne Guilloux en 2009, ces méthodologies et outils d'éco-conception reposent majoritairement sur l'analyse du cycle de vie du produit, de l'extraction de la matière pour le concevoir à sa fin de vie, en passant par sa fabrication, son transport et son utilisation. Elles nécessitent souvent de partir d'un produit existant, dont le cycle de vie est connu, afin de mener une étude sur chacune des étapes identifiées. En effet, il s'agit principalement, pour chaque étape du cycle de vie, de proposer un modèle des entrants / sortants environnementaux afin d'en limiter l'intensité et la nocivité pour l'environnement (DOMINGO, 2013). Cependant, ces outils demeurent complexes à mettre en oeuvre dans les phases très amont d'un processus de conception de produit innovant, d'autant plus, si nous nous positionnons dans le cadre de l'étude d'une brique technologique. En effet, ils reposent sur une analyse critique d'un produit déjà conçu, ou du moins, dont la conception est bien avancée. De plus, ils sont extrêmement coûteux en termes de temps et de frais engagés (GUILLOUX, 2009). Enfin, bien qu'elle reste extrêmement complexe à anticiper, à étudier pour les concepteurs de produits (BISGAARD et HOGENHAVEN, 2010), la phase d'utilisation du produit (utilisation courante, nettoyage, maintenance, recyclage par l'utilisateur etc.) a un impact environnemental aussi important que les autres (WENZEL, HAUSCHILD et ALTING, 2000). Dans le cadre d'une brique technologique, dont parfois l'usage n'est pas clairement défini, son anticipation, son étude est quasi impossible. Il en résulte donc une difficulté majeure pour définir un impact environnemental (DOMINGO, 2013 ; GUILLOUX, 2009). Des méthodes de recherche de solutions ou d'éco-innovation peuvent également être utilisées pour créer de nouveaux produits en minimisant l'impact environnemental ou pour modifier des produits en limitant leur impact. En effet, Teulon en 2015, définit l'éco-innovation comme : "l'élaboration et la mise sur le marché d'un produit ou d'un service plus respectueux de l'environnement et porteur, par rapport aux biens/services antérieurs, de valeur additionnelle pour le client ou pour l'entreprise, voire pour une autre partie prenante. Le respect de l'environnement s'entend sur l'ensemble du cycle de vie. La valeur additionnelle peut être une réduction de coût." Pour y parvenir, Issa et al en 2015, par exemple, proposent notamment de se focaliser sur les objectifs environnementaux comme leviers de conception pour chaque étape du cycle de vie (ISSA, PIGOSSO, MCALOONE et ROZENFELD, 2015). D'autres méthodes peuvent également être utilisées : les méthodes classiques de résolution de problèmes telles que TRIZ (SAVRANSKY, 2000) ou des outils plus spécifiquement dédiés à l'éco-conception comme, par exemple, Eco-Systematic (TYL, 2011) ou Open Green (TEULON, 2015) ou enfin des outils issus du marketing positionnant l'éco-innovation comme un critère de valeur différenciant tel qu'Océan Bleu (KIM et MAUBORGNE, 2010). Cette revue de la littérature sur les méthodes et outils d'éco-conception met en évidence que les outils classiques d'éco-conception, tels que les Analyses de Cycle de Vie, sont peu adaptés à l'étude d'une brique technologique. En effet, les données nécessaires au calcul d'une ACV sont peu ou pas connues à l'étape de développement considérée. En ce qui concerne les outils d'éco-innovation, ils reposent essentiellement sur l'utilisation de listes de critères environnementaux permettant de guider la réflexion, ces critères nous semblent pertinents à exploiter, mais non suffisants, dans un processus d'analyse d'une brique technologique.

1.2. Conception responsable - "Design for sustainability"

Si l'étude des impacts environnementaux d'un produit, d'un service, d'un système ou d'une brique technologique est centrale dans une réflexion sur la responsabilité sociétale des organisations de recherche, elle n'est pas suffisante. Le concept de "design for sustainability (D4S)", dépasse les problématiques d'éco-conception et exige que le processus de conception et le produit qui en résulte tiennent compte non seulement des préoccupations environnementales, mais aussi des préoccupations sociales et économiques. Les critères de conception des approches D4S se réfèrent aux trois piliers du développement durable : personne, profit et planète (UNEP, 2009). La principale approche méthodologique proposée est celle de TU Delft (UNEP, 2009). Elle repose essentiellement sur des méthodes et outils de benchmarking, de scénarisation de l'activité, sur des matrices d'évaluation des enjeux et des solutions et sur des directives de conception qui doivent aider les concepteurs à anticiper les impacts environnementaux et sociaux de leurs produits, sans oublier les enjeux économiques. Ces outils, notamment en ce qui concerne la scénarisation de l'activité, sont très proches de ceux utilisés en conception centrée sur les utilisateurs (ISO9241-210, 2010 ; NELSON, BUISINE et AOUSSAT, 2013 ; LOBBE, BAZZARO, CHARRIER et SAGOT, 2017) ou en "design thinking" (BROWN, 2009 ; MARTIN et HANINGTON, 2012). La conception centrée utilisateur vise à garantir l'acceptabilité, l'utilisabilité et l'utilité du produit ou système en se concentrant sur les utilisateurs, leurs besoins, leurs souhaits et leurs capacités. Pour y parvenir, elle propose notamment un processus de conception cyclique intégrant l'utilisateur final (ISO9241-210, 2010). Le "design thinking", pour sa part, cherche à offrir une expérience positive à l'utilisateur lors de l'utilisation du produit. Il requiert empathie et compréhension de l'utilisateur, créativité pour rechercher des solutions, prototypage et itération avec les utilisateurs pour valider les résultats obtenus (BROWN, 2009). L'une des problématiques majeures en "design thinking" et en conception centrée utilisateur est d'anticiper, de construire les usages futurs du produit, d'anticiper les interactions possibles, probables et souhaitables entre l'utilisateur et son produit. Ainsi, ces approches reposent essentiellement sur la mise en place d'outils prospectifs, de scénarisation des futurs possibles, probables permettant aux concepteurs, designers de se projeter dans des scénarios de vie du produit. Différents outils peuvent être proposés pour aboutir à cette approche (CARROLL, 2000 ; MARTIN et HANINGTON, 2013 ; LALLEMAND et GRONIER, 2015), tels que les scénarios d'usage, le "story telling", la "user journey map" etc. (MARTIN et HANINGTON, 2013 ; LALLEMAND et GRONIER, 2015 ; PATTON, AUBRY et MANIEZ, 2015). Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous souhaitons proposer des méthodes, outils, démarches de conception pour guider le chercheur, concepteur, dans la prise en compte des dimensions environnementales et sociales lors du développement d'une brique technologique. La revue de la littérature, dont nous proposons une synthèse dans le tableau 1.1, nous a permis de mettre en évidence les limites des outils d'ACV et la richesse des approches par heuristiques en phase d'innovation. Nous avons également mis en évidence, à travers les approches en conception centrée utilisateur et en "design for sustainability", la nécessité, dans un processus de conception, de pouvoir se projeter dans les futurs probables et possibles du produit, de la brique technologique, de scénariser son utilisation. Ces différents éléments nous permettent d'aboutir à la proposition méthodologique suivante.

	Eco-conception	Eco-innovation	Conception durable
Méthodes, outils utilisés	Analyse du cycle de vie	Heuristiques, Méthodes de créativité et de résolution de problèmes	Méthodes de conception centrée utilisateur, de "design thinking" et heuristiques
Etape de développement du produit étudié	Conception détaillée	Phase amont	Phase amont
Résultats obtenus	Quantitatifs	Qualitatifs	Qualitatifs

Tableau 1.1. *Caractéristiques des principales approches pour l'étude des impacts environnementaux et sociaux*

2. Proposition méthodologique

Afin de garantir à la fois une analyse experte et un regard neutre et dépassionné sur la brique technologique, il est fortement conseillé que l'analyse soit portée par, a minima, un binôme d'experts. Le premier est nécessairement un expert de la brique technologique, le second peut être un expert en innovation ou en conception centrée sur les utilisateurs, en "design thinking", etc. Pour faciliter la compréhension, nous retiendrons uniquement ce dernier terme, et parlerons d'expert en "design thinking". Ce dernier doit maîtriser les méthodes et outils liés à la réalisation de référentiels communs (DARSES et DE MONTMOLLIN, 2004), de parcours utilisateurs, de scénarisation de l'activité (MARTIN & HANINGTON, 2013 ; LALLEMAND et GRONIER, 2015 ; PATTON, AUBRY et MANIEZ, 2015). Il doit être capable de s'immerger dans une problématique technique et d'en extraire des synthèses claires, explicites communicables et utilisables par tous les autres acteurs du projet. La méthodologie préconisée se déroule en quatre étapes successives. Toutes les étapes sont conduites par l'expert en "design thinking" et les résultats produits sont évalués par l'expert de la brique technologique. Le premier garantit la prise de recul sur la problématique, le second vérifie la pertinence scientifique des analyses produites au regard du domaine étudié.

2.1. Découverte de la brique technologique

L'objectif de cette phase de découverte est, pour l'expert en "design thinking" de s'immerger complètement dans le domaine. Elle repose sur une analyse de la littérature scientifique du domaine ainsi qu'une analyse des tendances du domaine (MARTIN et HANINGTON, 2013) pour récolter des connaissances sur la brique technologique, ses environnements d'usages et usages potentiels et éventuellement les utilisateurs si ces derniers sont connus. Cette étape peut être réalisée grâce à une analyse de la littérature scientifique notamment en identifiant les avantages et les limites de la brique technologique étudiée par rapport à d'autres technologies ayant des fonctionnalités similaires. En ce qui concerne l'étude d'un produit, certains auteurs recommandent de se focaliser sur leurs caractéristiques esthétiques, sensorielles, fonctionnelles, éthiques, techniques et technologiques, mais également sur les matériaux utilisés, les procédés de fabrication, la réglementation, les enjeux économiques etc. (QUARANTE, 1994 ; HASSENZAHL, 2003 ; ARHIPAINEN et TAHTI, 2003 ; MAHLKE, 2007 ; ISO/TR 14062, 2002 ; DESMET et HEKKERT 2007 ; ASHBY, 2010 ; BROWN, 2009 ; DESMET et HEKKERT, 2007 ; ATASOY et MARTENS, 2011 ; CARROLL, 2000 ; ULRICH et EPPINGER, 1999). Dans le cadre d'une brique technologique, il semble pertinent de se focaliser sur les caractéristiques fonctionnelles de la brique, les matériaux utilisés, les procédés de fabrication, les systèmes techniques utilisés, les normes et réglementation en vigueur sur cette brique et les caractéristiques économiques. Pour compléter cette analyse

bibliographique et des tendances, il peut également être pertinent de conduire des séances d'observation des différentes étapes du cycle de vie. La phase de fabrication, si elle est réalisée dans un laboratoire de recherche, peut par exemple faire l'objet d'une observation experte. A partir des connaissances récoltées, des synthèses graphiques, sous formes de planche de synthèses (MARTIN et HANINGTON, 2013), pourront être construites. Ces planches de synthèse serviront de référentiels communs (DARSES et DE MONTMOLLIN, 2004), construites par l'expert en "design thinking" et validées par l'expert de la brique technologique. Un référentiel commun peut se définir comme une représentation commune des connaissances, favorisant le partage des connaissances et la communication entre les différents acteurs d'un projet. L'ensemble des référentiels communs construits doit permettre d'aboutir à une vision claire des forces et faiblesses de la brique technologique, au regard des usages et des technologies concurrentes, en termes de caractéristiques, de performance, d'intégration dans son environnement d'usage. Nous pouvons considérer que les faiblesses identifiées sont les verrous scientifiques, technologiques, mais également d'usage devant être levés pour favoriser le déploiement de la brique technologique (CHARRIER, 2016).

2.2. Scénariser le cycle de vie de la brique technologique

Les travaux en éco-conception reposent essentiellement sur des analyses de cycles de vie. L'analyse de la littérature a permis de mettre en évidence la limite de cette approche dans l'étude d'une brique technologique, notamment du fait du manque de données sur les différentes étapes. Nous souhaitons néanmoins conserver une réflexion sur l'ensemble du cycle de vie de produit. Ainsi, nous proposons, pour étudier le cycle de vie, de nous inspirer des outils de "story mapping" tels que les "user journey map" ou les parcours utilisateurs (MARTIN & HANINGTON, 2013 ; LALLEMAND et GRONIER, 2015 ; PATTON, AUBRY et MANIEZ, 2015) utilisés fréquemment en "design thinking" et en conception centrée utilisateur. L'objectif de cette deuxième étape est de représenter sous la forme d'un parcours se déroulant sur chacune des étapes du cycle de vie, le maximum d'actions, d'interactions entre l'utilisateur et la brique. L'utilisateur, ici, peut être un concepteur, un utilisateur, un opérateur, un chercheur etc. Cette étape d'identification ne vise pas l'exhaustivité de toutes les actions possibles au fil des états et de la vie de la brique technologique. Il s'agit notamment d'identifier celles permettant de positionner la brique technologique de manière différenciante par rapport à d'autres technologies, celles en lien avec les forces et faiblesses de la technologie, celles identifiées comme particulièrement riches à exploiter lors de la phase de découverte menées précédemment. Pour guider la réalisation de cette étape de scénarisation ainsi que les étapes suivantes, nous proposons la représentation graphique présentée sur la Figure 1. Les étapes du cycle de vie sont reprises sur la partie haute de la figure. Les actions, qui doivent être complétées par les experts menant l'analyse, sont positionnées dans la partie centrale de la Figure 1.

2.3. Identifier les impacts environnementaux et sociaux

Suite à cette première étape classique dans une réflexion en parcours, le duo "expert en design thinking - expert de la brique technologique", réalise une analyse des risques et des opportunités pour chaque action. Cette étude des risques et opportunités est réduite aux problématiques environnementales et sociales. Ensuite, pour chaque action, pour chaque risque et pour chaque opportunité, les experts conduisant le projet doivent chercher à identifier précisément les impacts environnementaux et sociaux qui en

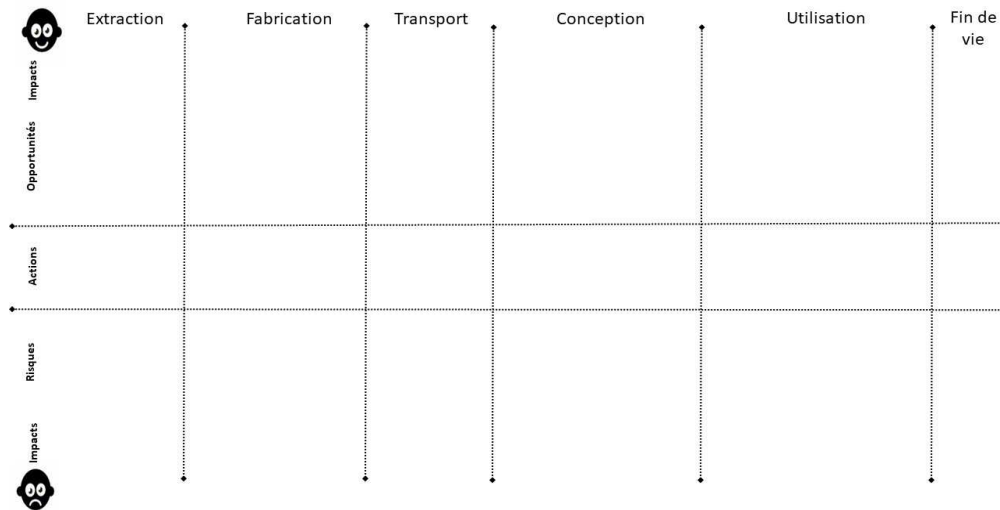


Figure 1. Représentation graphique permettant la mise en oeuvre de notre proposition méthodologique.
Source : auteur

découlent . Pour faciliter le travail de réflexion, des outils d'analyse des risques et les heuristiques d'éco-innovation (ISSA, PIGOSSO, MCALOONE et ROZENFELD, 2015) ou celles proposées en "design for sustainability" (UNEP, 2009), peuvent être utilisés. Ces risques et opportunités, et les impacts qui en découlent peuvent être complétées, pour chaque action, sur la représentation graphique proposée sur la Figure 1.

2.4. Identifier les problématiques scientifiques

Le résultat obtenu permet ainsi de visualiser dans une représentation unique l'ensemble des impacts environnementaux et sociaux liés à une brique technologique au regard des connaissances actuelles sur le domaine, d'une veille prospective et d'une analyse des usages potentiels. Le chercheur, qui souhaite s'interroger sur les voies de recherche qui s'ouvrent à lui, peut ainsi prendre des décisions en toute conscience notamment en se focalisant sur les risques inhérents à la technologie en termes d'impacts environnementaux et sociaux. Ces éléments sont aisément visualisables sur la partie basse de la Figure 1. Tout chercheur peut ainsi en déduire des verrous scientifiques et technologiques à lever pour limiter les impacts environnementaux et sociaux de la brique technologique en cours de développement. En effet, pour chaque risque (partie basse de la Figure 1) et les impacts associés, il peut s'interroger sur les pistes scientifiques permettant de transformer les risques en opportunités.

3. Etude de cas : les structures composites instrumentées

Par structures composites, nous entendons des structures constituées d'une combinaison d'au moins deux matériaux aux propriétés différentes (CAMPBELL, 2010). Cette combinaison permet d'obtenir de meilleures propriétés que celles des matériaux pris individuellement. De manière courante, les matériaux composites contiennent des fibres à haute résistance noyées dans une matrice servant de liant (GAY, 2014). Les structures composites intelligentes/instrumentées (smart composite structures) sont des structures qui peuvent changer leurs propriétés en fonction de stimuli. En fonction d'une certaine entrée, elles produisent une réponse prédictible et répétable appelée sortie (ESTHER, PISELLI, FAUCHEU, DELA-

FOSSE et DEL CURTO, 2014). Dans le présent travail, nous nous focaliserons sur les structures composites intelligentes produites au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Nous considérons les matériaux composites à matrice polymère à l'intérieur desquelles nous introduisons pendant la phase de fabrication des transducteurs piézoélectriques (capteurs et/ou actionneurs) (MEYER et LACHAT, 2015 ; Brevet n° WO2017013346.) Ainsi, ces éléments intégrés directement dans la structure peuvent permettre de contrôler son état de santé en temps réel, d'interagir avec d'autres structures avec des utilisateurs, de générer des contre-mesures vibratoires etc.(MEYER et LACHAT, 2015) .

3.1. Découverte des structures composites instrumentées

Les référentiels communs ont été construits par l'expert en "design thinking" sur la base d'une analyse de la littérature scientifique et des tendances du domaine et ont fait l'objet de nombreux échanges avec l'expert en structures composites instrumentées. 14 planches de synthèses ont été construites. Toutes ne sont pas directement utilisées dans l'étude mais toutes ont permis à l'expert en "design thinking" de s'immerger dans le domaine étudié. L'expert en "design thinking" a notamment construit cinq planches génériques permettant de présenter les matériaux utilisés, c'est-à-dire les matériaux composites et leurs principales caractéristiques fonctionnelles, notamment en termes de performances au regard des autres matériaux. Une planche présentant les domaines d'application des matériaux composites a également été proposée. Cette planche peut être considérée comme un référentiel commun sur l'usage. Dans un second temps, quatre planches ont été construites se focalisant sur les caractéristiques fonctionnelles des structures composites instrumentées, dont leur performance au regard des autres matériaux composites et les principaux domaines d'application. De même que précédemment, la planche sur les domaines d'application est considérée comme un référentiel commun sur l'usage. En ce qui concerne l'environnement, deux planches ont été proposées. La première s'est focalisée sur toutes les typologies d'environnement physique (gaz, solide, liquide, animaux, végétaux, terre, espace etc.) dans lesquels les structures composites instrumentées pouvaient être utilisées. La seconde a permis d'explorer de manière large tous les contextes d'usages potentiellement pertinents : à la maison, au travail, à l'hôpital etc.

3.2. Scénariser le cycle de vie des structures composites instrumentées

Les structures composites instrumentées sont des structures composites particulières. Pour avoir une approche la plus globale possible, le cycle de vie des structures composites et celui des structures composites instrumentées ont été scénarisés. Les actions principales à conduire sur chaque phase du cycle de vie ont été décrites comme présentées sur la Figure 2, en bleu pour les actions communes aux structures composites et aux structures composites instrumentées, en violet pour les actions propres aux structures composites instrumentées. Ces dernières ont été définies grâce aux référentiels communs construits précédemment.

3.3. Identifier les impacts environnementaux et sociaux

A partir des interactions entre la brique technologique et l'utilisateur, les risques et opportunités en lien avec des problématiques environnementales et sociales, ont été identifiés comme illustrés sur la Figure 2. Ces risques et opportunités sont issues de réflexions expertes. A partir de l'analyse des risques

et opportunités, une réflexion sur les impacts environnementaux et sociaux a été menée par l'expert en "design thinking" et l'expert de la brique technologique en utilisant notamment les directives de conception durable et écoresponsable identifiées précédemment (UNEP, 2009 ; ISSA, PIGOSSO, MCALOONE et ROZENFELD, 2015). Ces impacts environnementaux et sociaux sont indiqués sur la Figure 2. Cette représentation permet de proposer une synthèse des impacts environnementaux et sociaux positifs et négatifs liés aux différentes étapes du cycle de vie du produit.

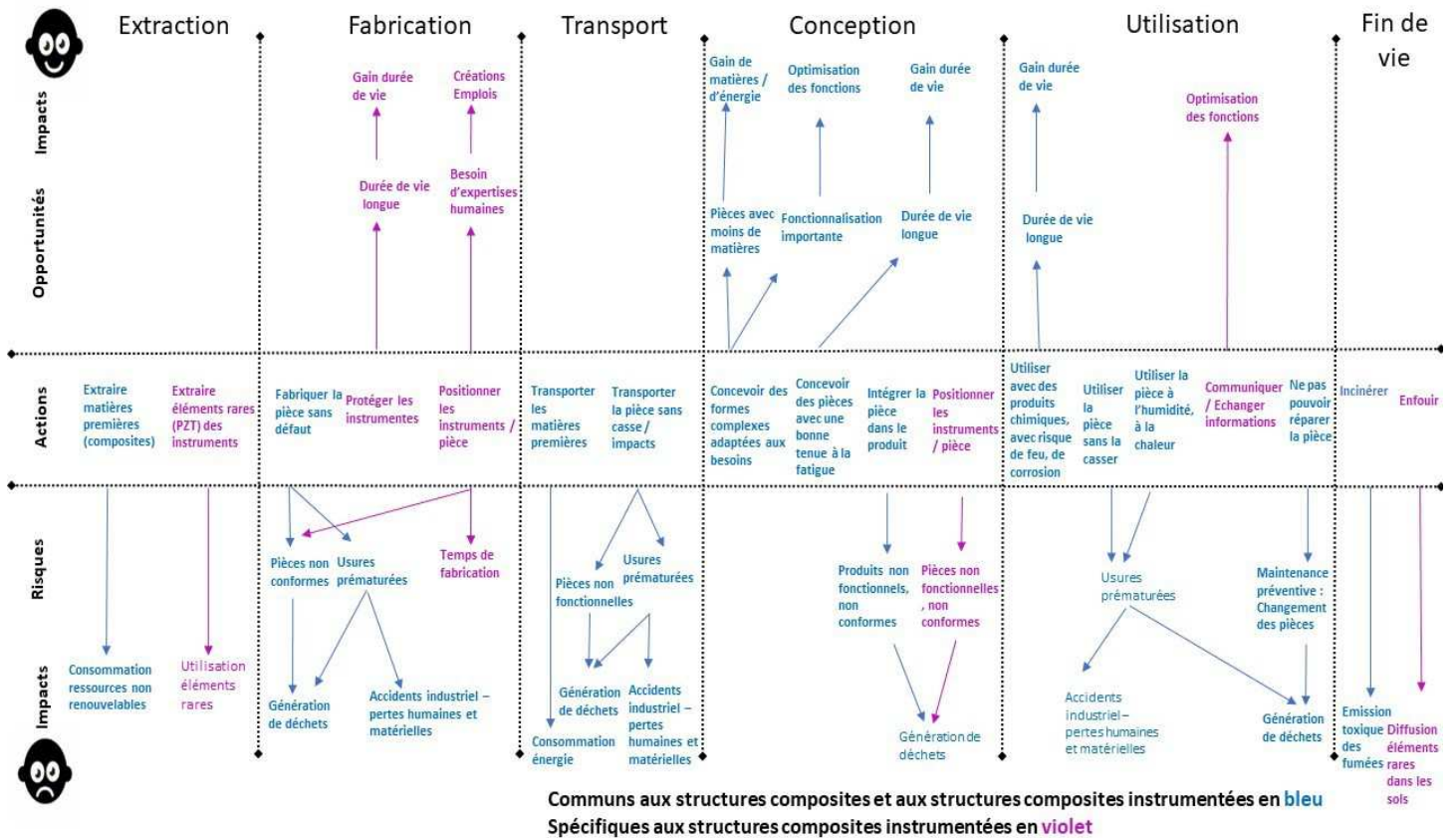


Figure 2. Parcours représentant le cycle de vie des structures composites instrumentées, analyses des risques, des opportunités et des impacts environnementaux et sociaux. Source : auteur

3.4. Identifier les problématiques scientifiques

A partir de ce parcours du cycle de vie, l'expert de la brique technologique, ici les structures composites instrumentées, a pu extraire un certain nombre de pistes de réflexion. Une analyse de la représentation proposée met clairement en évidence que l'utilisation des structures composites instrumentée n'a de sens, d'un point de vue impact environnemental, que si ces structures permettent de réduire les impacts liés aux composites. L'étude des structures composites met en évidence un certain nombre de problématiques environnementales, clairement identifiées dans le domaine. En effet, la course aux économies d'énergie, notamment via l'allègement des structures, a favorisé l'utilisation des matériaux composites à cause de leur grande résistance et de leur faible densité. L'augmentation du volume de production des structures composites (10 millions de tonnes par an dans le monde) entraîne une augmentation considérable des déchets issus des procédés de fabrication et des produits en fin de vie. L'instrumentation de ces structures composites induit de nouveaux impacts environnementaux mais permet une fonctionnalisation de la matière. Dans une recherche de minimisation des impacts environnementaux, la fonctionnalisation des structures peut être une solution permettant de répondre aux faiblesses des structures composites. Ainsi,

la fonctionnalisation peut, par exemple, permettre d'optimiser la durée de vie, de surveiller le transport, de faire du contrôle santé de la structure et ainsi de réduire les risques en termes d'usure prématurée, d'accidents industriels etc. Il apparaît, comme primordial, pour les chercheurs du domaine, de pouvoir quantifier et qualifier l'apport de la fonctionnalisation de la structure composite instrumentée sur les risques liés à la casse, aux chocs. De même, il s'agit pour les experts du domaine de définir des processus de fabrication des structures composites instrumentées, reposant sur leur fonctionnalisation, minimisant le risque, lors de la fabrication, d'aboutir à des structures mal stabilisées ou non fonctionnelles. Ainsi, par exemple, des travaux se doivent d'être conduits pour pouvoir mesurer et rectifier le processus de fabrication en temps réel. L'analyse met également clairement en évidence la nécessité de mener des activités de recherche en termes d'utilisation des matériaux biosourcées, mais également le besoin de développer à la fois des techniques d'extraction des éléments intégrés dans la matière, contenant des métaux rares et des techniques d'optimisation de la structure pour faciliter cette extraction.

4. Discussion

Notre objectif était de proposer une approche méthodologique, adaptée aux chercheurs d'un domaine d'activité particulier, lui permettant de s'interroger et de mener une réflexion sur les enjeux sociaux et environnementaux liés aux briques technologiques, objets de son étude. Notre approche méthodologique repose, d'une part, sur un travail collaboratif étroit et interdisciplinaire entre un expert en "design thinking" et en expert du domaine d'étude et d'autre part, sur l'utilisation d'outils de scénarisation du cycle de vie (MARTIN et HANINGTON, 2013 ; LALLEMAND et GRONIER, 2015 ; PATTON, AUBRY et MANIEZ, 2015) permettant de se projeter dans les risques, opportunités et impacts environnementaux, sociaux liés à l'utilisation de la brique technologique. La pertinence de notre proposition méthodologique est mise en évidence par une application sur une étude de cas : les structures composites instrumentées. Le parcours obtenu permet de poser les principaux verrous scientifiques et technologiques liés à cette brique technologique. Ce parcours a été soumis à évaluation de deux chercheurs en structures composites instrumentées, le premier ayant participé à l'ensemble des réflexions, le deuxième ayant uniquement pris connaissance des résultats finaux. Les retours recueillis soulignent la richesse et la complétude de notre approche. Les résultats que nous obtenons sont qualitatifs et ne considèrent pas nécessairement l'ensemble des interactions entre les différents impacts environnementaux et sociaux. Les outils classiques d'analyse du cycle de vie (ACV) prennent en considération ces interactions et proposent des analyses quantitatives extrêmement fines. Cependant, en accord avec des travaux de Guilloux en 2009 ou de Domingo en 2013, ils sont, selon nous, peu adaptés, à nos problématiques. En effet, la première étape d'une ACV consiste à définir une unité fonctionnelle. Comment définir précisément l'unité fonctionnelle d'une structure, à l'état de prototype, dont ni l'usage, ni les conditions d'utilisation ne sont définies ? Il est bien entendu possible de travailler par hypothèse, par scénario, mais, est-il pertinent, dans une ACV, d'avoir davantage d'hypothèses que de données fiables ? Peut-on vraiment appuyer un développement sur les résultats obtenus ?

La validation de notre proposition méthodologique nécessite de tester son applicabilité à d'autres briques technologiques. Une étude est en cours sur la pile à combustible. La pile à combustible est à un niveau de TRL plus haut que les structures composites instrumentées, même si elle n'a pas encore trouvé complètement son marché. Elle est industrialisée et commercialisée.

Ainsi, nos résultats sont encourageants et semblent conforter la pertinence de notre proposition méthodologique. Ils renforcent aussi notre conviction de la nécessité d'une équipe transdisciplinaire pour dérouler la méthodologie. En effet, il est indispensable d'intégrer, lors de la phase de découverte de la brique technologique, à la fois des données techniques et des données non techniques, liées aux usages, aux tendances sociétales, etc. Les phases de complétion des parcours, d'analyses des risques et opportunités et des impacts environnementaux et sociaux ont été réalisées par le duo d'experts dans le cadre de notre étude. Il pourrait être pertinent de les conduire en collaboration étroite avec des utilisateurs potentiels des technologies concernées. Des travaux dans cette perspective sont en cours.

Pour approfondir ces premiers résultats, il serait également pertinent d'explorer les possibles associations entre briques technologiques et services associés dans une perspective système produit-service ou, dans notre cas, dans une perspective système brique technologique-service. En effet, par exemple, dans le cadre de l'étude des structures composites instrumentées, il apparaît clairement que ces structures peuvent être, grâce à leur fonctionnalisation, une réponse à l'impact environnemental des composites. Cette fonctionnalisation permet ainsi d'intégrer de nouveaux services de contrôle, de surveillance de l'état de la structure, et ceci de manière intégrée tout au long de l'ensemble du cycle de vie de la structure composite. L'objectif est notamment une diminution des remplacements préventifs des structures et ainsi une augmentation de la durabilité des structures. Cette proposition est en accord avec de nombreux travaux liant étroitement les approches systèmes produits-services et éco-innovation ou éco-conception (AURICH, MANWEILER et SCHWEITZER, 2010 ; GEUM et PARK, 2010 ; LAPERCHE et PICARD, 2013). Ainsi, par exemple, Geum et Park en 2010 soulignaient que l'impact environnemental d'un produit pouvait être minimisé en fournissant les services appropriés durant le cycle de vie du produit. En 2010, Aurich et al., mettaient également en évidence la nécessité pour les entreprises de ne pas se focaliser uniquement sur les étapes de conception et de vente, pour aborder les fonctions et services associés sur l'ensemble du cycle de vie. Dans notre cas d'étude, la plus value d'associer des services à la brique technologique peut clairement apparaître sur les étapes de fabrication ou/et de maintenance du produit contenant la brique.

Une autre approche pourrait également être de considérer que pour concevoir un produit responsable et durable, il est nécessaire que le chercheur, l'ingénieur R&D ou l'entreprise dispose de méthodes, d'outils, voire de services lui permettant de concevoir son produit. Ainsi, notre proposition méthodologique pourrait être assimilée à un service, associé à la brique technologique en cours de développement, à destination des chercheurs, lui permettant de prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux. Ainsi, le système produit/brique technologique-service peut s'entendre dès la phase amont du processus de conception de produit/brique technologique. Il ne s'agit plus alors de concevoir un service complémentaire au produit/ à la brique mais de supporter le déploiement du produit/de la brique dans une démarche responsable grâce à un service d'accompagnement de la réflexion guidant une conception durable et responsable de la brique.

Pour conclure, il nous semble important de préciser que notre proposition méthodologique repose sur une analyse experte et qualitative des risques et opportunités et des impacts environnementaux et sociaux en découlant. Il en résulte donc la nécessité de conduire une analyse complète, la plus exhaustive possible, pour aboutir à des résultats exploitables par un chercheur, ou un acteur en R&D. Nous tenons à souligner qu'il est ensuite de la responsabilité individuelle de chaque chercheur, expert du domaine étudié, de déduire les actions de recherche à conduire lui permettant de faire ses choix de directions scientifiques en conscience. Notre proposition méthodologique ne vise pas à diriger ou conseiller le chercheur dans

ses choix. Elle vise uniquement à lui offrir une vision différente de son domaine de recherche, reposant sur des critères environnementaux et sociaux, qu'il ne considère pas nécessairement. Il lui appartient ensuite de choisir ou non d'emprunter les voies identifiées.

Bibliographie

ADEME, *Guide de recyclage des composites*. ADEME, 2017.

AFNOR, *NF X30-264 Février 2013 Management environnemental - Aide à la mise en place d'une démarche d'éco-conception*. Paris : AFNOR, 2013.

AKHRAS G., « Smart materials and smart systems for the future. » *Canadian Military Journal* 1, n° 3 (2000) : 25-31.

ARHIPAINEN L., TAHTI M., « Empirical evaluation of user experience in two adaptive mobile application prototypes. » *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. Norrköping : ACM, 2003.

ASHBY M.F., *Materials Selection in Mechanical Design (éd. 4e)*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2010.

ATASOY B., MARTENS J.-B., « Crafting User Experiences by Incorporating Dramaturgical Techniques of Storytelling. » *Proceedings of the Second Conference on Creativity and Innovation in Design, DESIRE'11*. New York : ACM, 2011.

AURICH J.C., MANWEILER C., SCHWEITZER E., « How to design and offer services successfully. » *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, n° 2 (2010) : 136-143.

BISGAARD T., HOGENHAVEN C., *Creating new concepts, products and services with user driven innovation*. Nordic Council of Ministers, 2010.

BOEUF J. L., « Design et innovation sociale. » *Sciences du Design* 2, (2011) : 88-90.

BRANGIER E., BARCENILLA J., *Concevoir un produit facile à utiliser : Adapter les technologies à l'homme*. Paris : Eyrolles - Editions d'Organisation, 2003.

BROWN T., *Change by Design : How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. New York : Harper Business, 2009.

CAMPBELL F.C., *Structural composite materials*. ASM International, 2010.

CARROLL J.M., « Five reasons for scenario-based design. » *Interacting with Computer* 13, n° 1 (2000) : 43-60.

DARSES F., DE MONTMOLLIN M., « La conception participative : vers une théorie de la conception centrée sur l'établissement d'une intelligibilité mutuelle. » Dans *Le consommateur au coeur de l'innovation [en ligne]* de J. Caelen, 25-41. Paris : CNRS Edition, 2004.

DESMET P., HEKKERT P., « Framework of product experience. » *International journal of design* 1, n° 1 (2007) : 57-66.

DOMINGO L., « Méthodologie d'éco-conception orientée utilisation. » Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, 2013.

ESTHER L., PISEELI A., FAUCHEU J., DELAFOSSE D., DEL CURTO B., « Smart materials : development of new sensory experiences through stimuli responsive materials. » In *Proceedings of 5th STS Italia Conference A Matter of Design : Making Society through Science and Technology*. STS Italia, 2013.

GAY D., *Composite materials : design and applications*. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2014.

GEUM Y., PARK Y. « Development of technology Roadmap for Product-service systems (TRPSS). » *Proceedings of the 2010 IEEE IEEM*, pp. 410-414, Macao China, 2010.

GUILLOUX G., « Ecodesign, du contexte au produit : contribution méthodologique à l'intégration de l'environnement dans les métiers du design industriel. » Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne & de L'université Polytechnique de Valencia, 2009.

HASSENZAHL M., « The Thing and I : Understanding the Relationship Between User and Product. » Dans *Funology, Human-Computer Interaction Series* de Blythe, M., Overbeeke, K., Monk, A., & Wright, P. (éds.), 31-42. Netherlands : Springer, 2003.

HILLGREN P.-A., SERAVALLI A., EMILSON A., « Prototyping and infrastructuring in design for social innovation. » *Co-Design* 7, n° 3-4, (2011) : 31-42.

IDEO, *Human Centered Design Toolkit*. Authorhouse, 2011.

- ISO/TR 14062, *Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit*. Paris : ISO, 2002.
- ISO14-040, *Environmental management – Life cycle assessment*. Paris : ISO, 2006.
- ISO16-290, *Systèmes spatiaux - Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMIT) et de leurs critères d'évaluation*. Paris : ISO, 2013.
- ISO26000, *Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale*. Paris : AFNOR, 2010.
- ISO9241-210, *Ergonomie de l'interaction homme-système, partie 210 : conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*. Paris : AFNOR-ISO, 2010.
- ISSA I.I., PIGOSSO D.C., MCALOONE T.C., ROZENFELD H., « Leading product-related environmental performance indicators : a selection guide and database. » *Journal of Cleaner Production* 108, (2015) : 321-330.
- KIM W.C., MAUBORGNE R., *Stratégie océan bleu : Comment créer de nouveaux espaces stratégiques*. London : Pearson Education, 2010.
- LACHAT R., MEYER Y., *Brevet n° WO2017013346*, 2017.
- LALLEMAND C., GRONIER G., *Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Paris : Editions Eyrolles, 2015.
- LAPERCHE B., PICARD F., « Environmental constraints, product-service systems development and impacts on innovation management : learning from manufacturing firms in the French context. » *Journal of Cleaner Production*, 53 (2013) : 118-128.
- LOBBÉ J., BAZZARO F., CHARRIER M., SAGOT J.-C. « Taking into account life situation during a co-creativity session : an exploratory study. » *Proceedings of the 21st International Conference of Engineering Design (ICED17)*, Vancouver, 2017.
- MAHLKE S., « User experience : usability, aesthetics and emotions in human-technology interaction. » Dans *Towards a UX Manifesto - COST294-MAUSE affiliated workshop* de Law, E.C., Vermeeren, A., Hassenzahl, M., et Blythe, M., 26-30, 2007.
- MANZINI E., « Making Things Happen : Social Innovation and Design. » *Design Issues* 30, n° 1 (2014) : 57-66.
- MARTIN B., HANINGTON B., *Universal Methods of Design : 100 Ways to Research Complex Problems, Develop Innovative Ideas, and Design Effective Solutions*. Beverly : Rockport Publishers. 2012.
- MEFTAH H., « Etude du comportement dynamique couplé au vieillissement des composites totalement recyclés à renfort car-bone : de la caractérisation à la modélisation. » Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM, 2018.
- MEYER Y., LACHAT R., « Smart composite structures : Benefits, technical issues and potential applications. » *JEC Composites Magazine* 105, (2015).
- MULGAN G., TUCKER S., ALI R., SANDERS B., « Social Innovation : What It Is, Why It Matters and How It Can Be Accelerated. » *Technical Report The Young Foundation*, 2007.
- NELSON J., BUISINE S., AOUSSAT A., « Anticipating the use of future things : Towards a framework for prospective use analysis in innovation design projects. » *Applied Ergonomics* 44, n° 6 (2013) : 948-956.
- PATTON J., AUBRY C., MANIEZ D., *Le story mapping : Visualisez vos user stories pour développer le bon produit*. Paris : Dunod, 2015.
- PHILLS J., DEIGLMEIER K.T., MILLER D., « Rediscovering Social Innovation. » *Stanford Social Innovation Review* 6, (2008).
- QUARANTE D., *Elements du design industriel*. Paris : Polytechnica, 1994.
- RABARDEL P., *Ergonomie, concepts et méthodes*. Paris : Octares, 2002.
- RADJOU N., PRABHU J., AHUJA S., *Jugaad Innovation : A Frugal and Flexible Approach to Innovation for the 21st Century*. India : Random House. 2012.
- RMIT - CENTRE OF DESIGN, *Introduction to EcoReDesign : improving the environmental performance of manufactured products*. Melbourne. 1997.
- ROCKEFELLER FOUNDATION, *Design for social impact : how to guide*. 2008.
- SAVRANSKY, S.D., *Engineering of Creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*. CRS Press, 2000.
- TEULON, H., *Le guide de l'éco-innovation : Eco-concevoir pour gagner en compétitivité*. Paris : Eyrolles, 2015.

TYL B., « L'apport de la créativité dans les processus d'éco-innovation - Proposition de l'outil EcoASIT pour favoriser l'éco-idéation de systèmes durables. » Thèse de Doctorat en Mécanique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I. 2011.

ULRICH K. T., EPPINGER S. D., *Product Design and Development : second edition 1999 - Fifth edition 2012*. Boston : McGraw-Hill Companies, 1999.

UNEP *Design for Sustainability - A step-by-step approach*. TU Delft, 2009.

VERKOOYEN H., *PROMISE Handleiding voor Milieugerichte Produkt Ontwikkeling (PROMISE : Manual for ecodesign)*. The Netherlands : SdU Uitgeverij, Den Haag, 1994.

WENZEL H., HAUSCHILD M. Z., ALTING L., *Environmental Assessment of Products : Volume 1 : Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. London : Springer, 2000.